

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

مهندسی برق-کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

شناسایی و کنترل هوشمند توربین آبی ارتفاع متوسط

نگارنده: امین اله دهقان

استاد راهنما

دکتر علیرضا الفی

آبان ماه ۱۳۹۱



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره : ۱۰۱۲/آ.ت.ب
تاریخ : ۹۱/۱۰/۱۸
ویرایش : -----

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :
امین ... دهقان رشته : برق گرایش : کنترل
تحت عنوان : شناسایی و کنترل هوشمند توربین آبی ارتفاع متوسط
که در تاریخ ۹۱/۱۰/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : خوب امتیاز ۱۷/۹۹) دفاع مجدد مردود

- ۱- عالی (۲۰ - ۱۹)
۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)
۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)
۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	علیرضا الفی	استاد	
۲- استاد مشاور	---	---	---
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	سینا قلی زاده	استاد	
۴- استاد ممتحن	محمد اصغری	استاد	
۵- استاد ممتحن	عمادرضا حسین زاده	استاد	

رئیس دانشکده :

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

**که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یآوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن
برایم بوده‌اند.**

به مصداق «من لم يشكر المخلوق لم يشكر الخالق» بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه

جناب **آقای دکتر علیرضا الفی** که با کرامتی چون خورشید ، سرزمین دل را روشنی

بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کار ساز و سازنده بارور ساختند ؛ تقدیر و

تشکر نمایم.

اینجانب امین اله دهقان دانشجوی رشته مهندسی برق کنترل ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۹ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و رباتیک متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه صنعتی شاهرود را درانتشار یافته های علمی مستخرج از پایان نامه خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع به نام بنده و یا هرگونه امتیاز دیگر و تغییر آن نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضررو زیان حاصله براساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم.

چکیده:

بحران کمبود آب و نسل جدید انرژی‌های سازگار با محیط زیست از مهمترین چالش‌های روز دنیا به حساب می‌آید. یکی از راهکارهای رسیدگی به این چالش‌ها احداث سد و نیروگاه برق آبی است.

از آنجائیکه خیلی از تجهیزات نیروگاه و شبکه به تغییرات فرکانس حساس هستند، ثابت بودن سرعت توربین یکی از ضروریات مبرم است. کنترل سرعت توربین وظیفه سامانه گاورنر بوده و در بیشتر سامانه‌های گاورنر از کنترل-کننده‌های تناسبی، انتگرالی، مشتق‌گیر (PID) برای این منظور استفاده می‌شود. سیستم کنترل سرعت توربین (ژنراتور) شامل سیستم هیدرولیک، توربین، سرو موتور (جهت باز و بسته نمودن دریچه) و ژنراتور می‌باشد. ویژگی نامی نیمم فاز بودن سیستم، پیچیدگی، غیرخطی بودن و عدم قطعیت‌های سیستم باعث می‌شود که تنظیم ضرایب PID امری دشوار باشد. از اینرو در این پایان‌نامه برای تنظیم این ضرایب از الگوریتم‌های تکاملی از جمله ژنتیک و بهینه سازی انبوه ذرات که عملکرد مناسبی در مسائل بهینه سازی داشته‌اند استفاده می‌شود. هرچند الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات نتایج مناسب‌تری نسبت به ژنتیک دارد اما مشکل هر دو الگوریتم کند بودن همگرایی است که جهت رفع این مشکل از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات برای بهینه سازی وزنه‌های اولیه شبکه عصبی جهت تنظیم ضرایب PID استفاده می‌شود. چون مدل سیستم دقیق نبوده و دارای عدم قطعیت می‌باشد از یک شناساگر نیز برای تنظیم دقیقتر ضرایب کنترل‌کننده استفاده می‌شود. درنهایت برای مدلسازی یک سیستم واقعی از مشخصات سد دز استفاده شده و الگوریتم‌های فوق برای شناسایی و کنترل این سد شبیه‌سازی شده است. در شبیه سازی‌ها عملکرد کنترل‌کننده به ازای تغییرات ناگهانی بار و تغییر نقطه تنظیم نیز انجام می‌گیرد. نیروگاه، سد دز، گاورنر، کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مشتق‌گیر، شبکه‌های عصبی، بهینه سازی انبوه ذرات، الگوریتم ژنتیک.

فهرست مطالب

مقدمه.....	۱
۱-۱ اهمیت مسأله.....	۲
۲-۱ ویژگی‌های نیروگاه آبی.....	۴
۳-۱ انواع توربین.....	۶
۴-۱ ساختار پایان‌نامه.....	۷
فصل دوم: مدلسازی.....	۸
۱-۲ مقدمه.....	۹
۱-۲ مدل سیستم هیدرولیک.....	۹
۲-۲ تانک تعادل.....	۱۲
۳-۲ سروموتور.....	۱۳
۴-۲ توربین.....	۱۳
۵-۲ مدل‌های غیرخطی توربین‌های هیدرولیکی.....	۱۵
۱-۵-۲ مدل توربین غیرخطی ساده.....	۱۵
۲-۵-۲ مدل غیرخطی توربین با فرض ستون آب غیر ارتجاعی.....	۱۶

- ۳-۵-۲ مدل غیرخطی بدون تانک تعادل با تاثیر ستون آب ارتجاعی..... ۱۷
- ۴-۵-۲ مدل غیرخطی توربین با تانک تعادل و فرض آب غیر ارتجاعی..... ۱۸
- ۵-۵-۲ مدل غیرخطی توربین با تانک تعادل با فرض ستون آب ارتجاعی در پنستاک و آب غیرارتجاعی در تونل نزدیک به سد..... ۱۹
- ۶-۵-۲ مدل های خطی توربین..... ۲۰
- ۱-۶-۵-۲ مدل خطی توربین با تانک تعادل و با فرض آب غیر ارتجاعی..... ۲۱
- ۲-۶-۵-۲ مدل خطی توربین با تانک تعادل با فرض ستون آب غیر ارتجاعی در پنستاک..... ۲۲
- ۶-۲ مدل دینامیکی ژنراتور..... ۲۳
- ۷-۲ گاورنر..... ۲۵
- فصل سوم: الگوریتم های تکاملی**..... ۲۹
- ۱-۳ الگوریتم ژنتیک..... ۳۰
- ۲-۳ الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات..... ۳۲
- فصل چهارم: شبیه سازی نیروگاه**..... ۳۵
- ۱-۴ شبیه سازی مدل خطی شده توربین..... ۳۶
- ۲-۴ شبیه سازی مدل غیرخطی توربین..... ۴۴

۴-۳ ساختار شبکه عصبی..... ۴۵

۴-۴ شناسایی سیستم..... ۵۰

۴-۵ شبیه‌سازی سد دز..... ۵۵

۴-۶ بهینه‌سازی وزن‌های اولیه شبکه عصبی با استفاده از PSO ۶۰

۴-۷ بررسی عملکرد کنترل‌کننده به ازای تغییرات ناگهانی بار و تغییر نقطه تنظیم ۶۵

فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات..... ۶۹

پیوست..... ۷۱

منابع..... ۸۷

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) بلوک دیاگرام سیستم کنترل سرعت توربین ۹
- شکل (۲-۲) بلوک دیاگرام راه انداز دریچه ۱۳
- شکل (۳-۲) تابع تبدیل سروموتور ۱۳
- شکل (۴-۲) مدل غیر خطی توربین ساده شده ۱۶
- شکل (۵-۲) مدل غیرخطی توربین بدون تانک تعادل با فرض ستون آب غیرارتجاعی ۱۷
- شکل (۶-۲) مدل غیرخطی توربین بدون تانک تعادل با فرض ستون آب غیر ارتجاعی ۱۸
- شکل (۷-۲) مدل غیر خطی توربین با تانک تعادل و فرض آب غیر ارتجاعی ۱۹
- شکل (۸-۲) مدل غیر خطی توربین با تانک تعادل و فرض ستون آب ارتجاعی در پنستاک و آب غیر ارتجاعی در
تونل نزدیک به سد ۲۰
- شکل (۹-۲) مدل خطی توربین با تانک تعادل با فرض ستون آب غیر ارتجاعی ۲۲
- شکل (۱۰-۲) مدل خطی توربین با تانک تعادل با فرض ستون آب ارتجاعی در پنستاک ۲۳
- شکل (۱۱-۲) ساختار کنترل کننده PID ۲۷
- شکل (۱-۴) منحنی هیل ۳۷
- شکل (۲-۴) دیاگرام نیروگاه آبی با یک تانک تعادل ۳۸
- شکل (۳-۴) بلوک دیاگرام توابع تبدیل خطی نیروگاه آبی ۴۰

- شکل (۴-۴) بلوک دیاگرام تنظیم ضرایب PID با الگوریتمهای هوشمند..... ۴۱
- شکا (۵-۴) میانگین تابع هزینه کروموزومها در ژنتیک و ذرات در PSO ۴۱
- شکل (۶-۴) پاسخ پله سیستم خطی به کنترل کننده های طراحی شده توسط الگوریتمهای ژنتیک و PSO ۴۲
- شکل (۷-۴) سیگنال کنترل برای سیستم خطی..... ۴۳
- شکل (۸-۴) تغییرات ضرایب کنترل کننده برای سیستم خطی..... ۴۳
- شکل (۹-۴) بلوک دیاگرام تنظیم ضرایب PID با استفاده از شبکه عصبی..... ۴۵
- شکل (۱۰-۴) ساختار شبکه عصبی تنظیم کننده ضرایب PID ۴۶
- شکل (۱۱-۴) بلوک دیاگرام روش شناسایی و کنترل سیستم..... ۵۱
- شکل (۱۲-۴) ساختار شبکه عصبی شناسایی کننده سیستم..... ۵۲
- شکل (۱۳-۴) تغییرات تابع هزینه الگوریتم ژنتیک و PSO برای سد دز..... ۵۶
- شکل (۱۴-۴) خروجی سیستم سد دز برای ورودی پله مربوط به کنترل کننده های طراحی شده ۵۶
- شکل (۱۵-۴) خروجی شبکه عصبی شناساگر و خروجی سیستم سد دز..... ۵۷
- شکل (۱۶-۴) مشتق خروجی شناساگر نسبت به سیگنال کنترل..... ۵۷
- شکل (۱۷-۴) نرخ تغییرات ضریب مشتق گیر توسط شبکه عصبی..... ۵۸

شکل (۴-۱۸) نرخ تغییرات ضریب انتگرال‌گیر توسط شبکه عصبی..... ۵۸

شکل (۴-۱۹) نرخ تغییرات بهره تناسبی توسط شبکه عصبی..... ۵۹

شکل (۴-۲۰) نرخ تغییرات ضریب مشتق‌گیر حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک و PSO برای سیستم سد دز ۵۹

شکل (۴-۲۱) نرخ تغییرات ضریب انتگرال‌گیر حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک و PSO برای سیستم سد دز

..... ۶۰

شکل (۴-۲۲) نرخ تغییرات ضریب مشتق‌گیر حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک و PSO برای سیستم سد دز ۶۰

شکل (۴-۲۳) پاسخ پله سیستم برای کنترل‌کننده‌های طراحی شده با شبکه عصبی، شبکه عصبی بهینه شده و

PSO ۶۲

شکل (۴-۲۴) نرخ تابع هزینه الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی وزنه‌های اولیه شبکه عصبی..... ۶۳

شکل (۴-۲۵) حرکت سه ذره مختلف به سمت نقطه بهینه..... ۶۳

شکل (۴-۲۶) تغییرات سیگنال کنترل..... ۶۴

شکل (۴-۲۷) نرخ همگرایی دو نمونه از وزنه‌های شبکه عصبی شناساگر..... ۶۴

شکل (۴-۲۸) خروجی سیستم شبکه عصبی شناساگر با استفاده از شبکه عصبی بهینه..... ۶۵

شکل (۴-۲۹) تغییرات خروجی سیستم به ازای تغییر نقطه کار و افزایش ناگهانی بار..... ۶۶

شکل (۴-۳۰) نمودار تغییرات سیگنال کنترل به ازای تغییر نقطه تنظیم و تغییر ناگهانی بار..... ۶۶

شکل (۴-۳۱) روند تغییرات ضریب انتگرال‌گیر به ازای تغییر نقطه تنظیم و افزایش ناگهانی بار... ۶۷

شکل (۴-۳۲) نمودار باز شدن گیت به ازای تغییرات بار و تغییر نقطه تنظیم ۶۷

فهرست جدول‌ها

جدول (۴-۱) مشتقات جزئی توربین ۳۷

جدول (۴-۲) ضرایب توربین ایده‌آل در شرایط کاری مختلف ۳۸

جدول (۴-۳) ضرایب توربین برای نیروگاه شبیه سازی شده ۳۹

جدول (۴-۴) پارامترهای کنترل کننده طراحی شده برای سیستم خطی به همراه کمترین مقدار تابع هزینه

..... ۴۲

جدول (۴-۶) مقادیر زمان شروع آب برای حالت های مختلف ۵۵

جدول (۴-۷) مقایسه پارامترهای مختلف روش‌های بهینه سازی برای کنترل کننده سد دز ۵۶

جدول (۴-۸) ضرایب کنترل کننده PID برای شبکه عصبی و شبکه عصبی بهینه شده ۶۲

فصل اول

مقدمه

۱-۱ اهمیت مسئله

آب یک منبع قابل تجدید می‌باشد که در طبیعت چرخه‌ای را به طور مستمر طی می‌نماید. در طی این چرخه، بر اثر تابش خورشید بر سطح دریاها و اقیانوس‌ها مقدار زیادی از آب تبخیر می‌شود و پس از جذب در اتمسفر بوسیله جریان‌های هوا به سراسر کره زمین منتقل می‌گردد. در طی این جریان تقطیر شده و به شکل باران ریزش می‌کند و به رودخانه‌ها می‌پیوندد، که در نهایت به دریاها و دریاچه‌ها منتهی می‌شوند. این فرایند به طور مستمر در طبیعت تکرار می‌شود.

انرژی آب از دیرباز به عنوان یک منبع انرژی مورد توجه بشر قرار گرفته است، به عنوان مثال در ایران قدیم از انرژی آب در آسیاب‌های آبی برای آرد کردن غلات استفاده می‌گردید. در صد سال اخیر، استفاده از انرژی آب به عنوان یک منبع بالقوه پایان‌ناپذیر انرژی برای سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی در کشورهای پیشرفته توسعه فراوانی یافته است و در کشور ایران نیز در چند دهه اخیر با توجه به محدود بودن عمر انرژی‌های فسیلی، ملاحظات زیست محیطی و دیگر مزایای نیروگاه‌های برق آبی، از جمله کنترل سیلاب و تامین و تنظیم آب کشاورزی و شرب و وجود پتانسیل‌های قابل توجه انرژی برق آبی در کشور، این روش تولید انرژی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. انرژی قابل استحصال از آب نه تنها در آبهای جاری در سطح خشکی زمین نهفته است، بلکه دریاها و اقیانوسها نیز از منابع بزرگ انرژی آبی محسوب می‌گردند، بدین لحاظ تکنولوژی‌های تولید برق از انرژی آب را به دو نوع کلی نیروگاه‌های آبی و نیروگاه‌های دریایی تقسیم می‌نمایند [۱-۳]. در نیروگاه‌های آبی با تبدیل انرژی موجود در آب‌های جاری در سطح خشکی زمین تولید انرژی الکتریکی می‌گردد و در نیروگاه‌های دریایی از انرژی بیکران نهفته در دریاها و اقیانوس‌ها برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود [۴].

بحران کمبود آب و نسل جدید انرژی‌های سازگار با محیط زیست که مطابق با ویژگی‌های توسعه پایدار نیز باشد، از مهم‌ترین چالش‌های روز دنیا به حساب می‌آید، که به منظور رسیدگی به این چالش‌ها راه حل و رویکردهای بسیاری در دنیا ارائه شده است. یکی از این راهکارها احداث سد و نیروگاه برق آبی است. ایران در دوره جدید در حال ترویج و توسعه تولید انرژی‌های سازگار با محیط زیست از جمله نیروگاه‌های برق آبی است.

در نیروگاه‌های آبی از انرژی پتانسیل نهفته در آب‌های جاری در سطح خشکی برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌گردد. آب‌های جاری در جریان چرخه خود در طبیعت همواره با توجه به اختلاف سطح خود نسبت به دریاها آزاد دارای انرژی پتانسیل هستند که قابل تبدیل به انرژی الکتریکی می‌باشد. نیروگاه‌های آبی دارای بازدهی بسیار بالایی در حدود ۸۰ درصد و بیشتر از آن می‌باشند، که با گذشت زمان و استهلاک نیروگاه در میزان آن تغییر قابل محسوسی حاصل نمی‌گردد. هزینه سرمایه گذاری ویژه احداث این نیروگاه‌ها و نیز مدت زمان ساخت آن‌ها در مقایسه با دیگر نیروگاه‌ها بالا می‌باشد. اما هزینه‌های تعمیرات و نگهداری و نیز تعداد پرسنل مورد نیاز برای بهره برداری از آن‌ها بسیار کمتر از نیروگاه‌های فسیلی است. سوخت آن‌ها (آب) رایگان می‌باشد. این نیروگاه‌ها در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی دارای طول عمر بیشتری می‌باشند. طول عمر این نیروگاه‌ها بالغ بر ۵۰ سال می‌باشد، در حالی که طول عمر مفید نیروگاه‌های فسیلی در حدود ۲۰ سال برآورد می‌گردد [۱-۳]. نیروگاه‌های آبی به دلیل عدم استفاده از سوخت‌های فسیلی، فاقد هر گونه آلاینده‌گی در محیط زیست می‌باشند. احداث این نیروگاه‌ها با توجه به نیاز آن‌ها به وجود آب، تنها در محل‌های خاصی که اغلب بسیار دور از مناطق مصرف واقع شده‌اند امکان‌پذیر می‌باشد. این نیروگاه‌ها انرژی ذخیره شده آب در ارتفاع بالا را با استفاده از توربین‌های آبی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. در این نیروگاه‌ها تبدیلات مکانیکی انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی و سپس به انرژی الکتریکی انجام می‌شود [۴].

بیشتر تجهیزات مرتبط با نیروگاه آبی در مقابل تغییرات فرکانس حساس هستند. بنابراین کنترل سرعت سیستم یک ضرورت است. کنترل دبی عبوری از توربین نتیجه‌اش ابقاء یک سرعت ثابت برای به حرکت در آوردن ژنراتور و تنظیم قدرت خروجی است. این عمل به وسیله بکار گرفتن دریچه کوچک یا شیرها انجام می‌شود. چنین عملی نیاز

به مکانیزمی جهت کنترل دریچه‌ها دارد که به گاورنر^۱ یا سیستم گاورنر مرسوم می‌باشد. در موقع کاهش بار، سرعت افزایش می‌یابد و گاورنر باید دریچه را به اندازه‌ای مسدود کند که گشتاور ایجاد شده توسط توربین برابر با گشتاور ارائه شده به وسیله بار الکتریکی روی ژنراتور باشد و سرعت به سرعت سنکرون مناسب برسد [۵].

۲-۱ ویژگی‌های نیروگاه آبی

نیروگاه‌های آبی از جنبه‌های زیادی با انواع دیگر نیروگاه‌های سامانه قدرت، که عمدتاً در ردیف نیروگاه‌های حرارتی قرار می‌گیرند، تفاوت دارند. هرچند این نیروگاه‌ها نیز مانند بقیه نیروگاه‌ها دارای اجزای اصلی ضروری برای تولید قدرت، یعنی توربین، ژنراتور، گاورنر و تحریک‌کننده مجهز به دستگاه تنظیم ولتاژ می‌باشند، لیکن این تجهیزات تفاوت‌هایی با تجهیزات متناظرشان در نیروگاه‌های حرارتی دارد که اهم آن به شرح زیر است:

- یک واحد (توربین/ژنراتور) برق آبی اصولاً دارای سرعت دوران کمتری نسبت به واحدهای نوع بخاری و یا گازی می‌باشد.
- یک واحد برق آبی نیاز به گاورنر با قدرت عمل‌کننده بیشتری دارد، تا هنگام بستن دریچه‌های توربین در حالت حذف ناگهانی بار، بر نیروهای زیاد مقاومت‌کننده از جمله نیروی دینامیکی آب غلبه کند.
- نیروگاه‌های آبی، در مقایسه با نیروگاه‌های حرارتی به سامانه‌های کمکی کمتری نیاز دارند.
- نیروگاه‌های آبی در مدت زمان کمتری نسبت به انواع نیروگاه‌های حرارتی راه‌اندازی می‌شوند.
- واحدهای آبی پایداری نسبتاً خوبی در مقابل اغتشاشات پدید آمده در سامانه قدرت که منجر به تغییرات زیاد فرکانس می‌شود، دارند و در صورت جدا شدن از سامانه سراسری، عموماً در شرایطی قرار می‌گیرند که به سرعت قابل بارگیری و بهره‌برداری مجدد می‌باشند [۳].

^۱ Governor

تمامی نیروگاه‌های آبی نیاز به سد دارند. سد مقادیر زیادی آب را در پشت خود ذخیره می‌کند. حوضچه سد معمولاً آب پشت خود را برای پریرود^۲ هفته‌ای نگهداری می‌کند و این پریرود کوتاه در مقایسه با سال و ماه است. سازه آبگیر به منظور برداشت آب مورد نیاز نیروگاه از مخزن سد احداث می‌شود. ورودی آبگیر می‌تواند دارای یک یا چند دهانه باشد. از دهانه‌های آبگیر، آب به داخل تونل‌ها و یا لوله‌های تحت فشار اصلی و سپس به پنستاک‌ها هدایت می‌شود. پنستاک^۳ به عنوان مجرا یا لوله تحت فشار، تأمین آب توربین را از طریق آبگیر به عهده دارد. جانمایی و ساختمان پنستاک به نوع نیروگاه، جانمایی آبگیر، سرعت انتقال آب و طول مجرای آبرسان و مشخصات ژئوتکنیکی محل بستگی دارد. تخلیه آب توربین‌ها از طریق پایاب^۴ انجام می‌شود. جانمایی آن به گونه‌ای است که میزان غرقابی ضروری برای توربین تأمین شود و همچنین شرایط مناسبی برای تخلیه لوله مکش توربین فراهم گردد[۳].

نیروگاه‌های آبی از نظر ارتفاع ریزش آب به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند[۴].

الف) نیروگاه‌های با ارتفاع کم آب: این نیروگاه‌ها دارای ارتفاع ریزش آب کمتر از ۳۰ متر هستند. این ارتفاع بیانگر ارتفاع مابین سطح آب پشت سد و سطح آب خروجی از توربین است. در این نیروگاه‌ها، توربین‌های کاپلان^۵ یا فرانسیس^۶ جریان مختلط به کار می‌رود.

ب) نیروگاه‌های با ارتفاع متوسط آب: این نیروگاه‌ها برای ارتفاع ریزش آب ۳۰ تا ۳۰۰ متر به کار می‌روند. در این نیروگاه‌ها از یک کانال باز، آب پشت سد را از مخزن پشت سد و از طریق لوله‌های مجاری^۷ آب را به

^۲ Period

^۳ Penstock

^۴ Draft tube

^۵ Kaplan

^۶ Francis

^۷ Conduit

سمت توربین هدایت می‌کنند. توربین فرانسسیس جریان شعاعی یا کاپلان در این نوع نیروگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ج) نیروگاه‌های با ارتفاع زیاد آب: این نیروگاه‌ها دارای ارتفاع ریزش آب بیش از ۳۰۰ متر هستند. کارهای عمرانی این نیروگاه‌ها در حجم بسیار زیادی صورت می‌گیرد که از جمله: ساخت سد، مخازن، تونل‌ها، تانک‌های ذخیره و مجاری آب است.

۳-۱ انواع توربین

توربین آبی یک محرک اولیه است که انرژی پتانسیل آب را به انرژی مکانیکی دورانی (چرخشی) تبدیل می‌کند و وظیفه اصلی آن به گردش در آوردن یک ژنراتور هیدرو الکتریکی است.

توربین‌های آبی به دو گروه اصلی توربین‌های عکس‌العملی و توربین‌های ضربه‌ای طبقه بندی می‌شوند. این طبقه‌بندی بر اساس نحوه تبدیل انرژی پتانسیل یا فشار به انرژی جنبشی می‌باشد. در توربین‌های عکس‌العملی تنها قسمتی از فشار به سرعت تبدیل می‌شود. بخش عمده‌ای از نیروی اعمال شده به یک توربین عکس‌العملی ناشی از اختلاف فشار بین بالا و پایین پره‌های چرخ توربین می‌باشد. توربین‌های ضربه‌ای با استفاده از شیپوره‌های انقباضی (نازل) تمامی فشار آب را به انرژی جنبشی یا سرعت دورانی تبدیل می‌کنند. آب از طریق نازل‌ها بر روی بشقابک‌های چرخ توربین پاشیده می‌شود و نیروی در جهت جریان به چرخ توربین اعمال می‌کند. و این نیرو یا ضربه چرخ توربین را می‌چرخاند. توربین‌های ضربه‌ای با ارتفاع موثر ۳۰۰ متر یا بالاتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. ولی در برخی موارد در ارتفاع پایین‌تر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این نوع توربین‌ها جریان آب به وسیله شیر سوزنی کنترل می‌شود. برای تغییر سرعت، موقعیت شیر سوزنی به وسیله یک گاورنر کنترل می‌گردد [۱].

انواع مهم توربین‌های عکس‌العملی عبارتند از: توربین‌های نوع فرانسسیس و توربین‌های نوع پروانه‌ای.

- انواع توربین پروانه‌ای عموماً برای ارتفاع‌های کم و سرعت مخصوص بالا (۴۰۰ الی ۱۰۰۰) به کار می‌روند.
 - انواع توربین فرانسسیس برای ارتفاع‌های متوسط و سرعت مخصوص از حدود ۶۰ تا ۴۵۰ به کار می‌روند.
- توربین‌های فرانسسیس بیشترین کاربرد را در ساخت نیروگاه‌های آبی با ارتفاع متوسط و زیاد را دارند. در ایران تمام نیروگاه‌های موجود با واحدهای متوسط و بزرگ (غیر از نیروگاه سد ارس) و نیز نیروگاه‌های در دست احداث از نوع فرانسسیس با محور عمودی می‌باشد [۳].

۴-۱ ساختار پایان‌نامه

در این پایان‌نامه ابتدا در فصل دوم به مدل‌سازی خطی و غیرخطی قسمت‌های مختلف نیروگاه از جمله سیستم هیدرولیک، توربین، ژنراتور و گاورنر می‌پردازیم. سپس در فصل سوم مروری بر الگوریتم‌های تکاملی از جمله الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی انبوه ذرات که در بهینه‌سازی کنترل‌کننده استفاده شده‌اند، خواهیم داشت. در فصل چهارم شبیه‌سازی نیروگاه به صورت خطی و غیرخطی و بهینه‌سازی کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و شبکه‌های عصبی استفاده شده است. در نهایت ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات و شبکه عصبی برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده استفاده شده است. در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای ادامه کار را خواهیم داشت. در پیوست نیز به جزئیات اثبات بعضی از روابط موجود در متن اصلی می‌پردازیم.

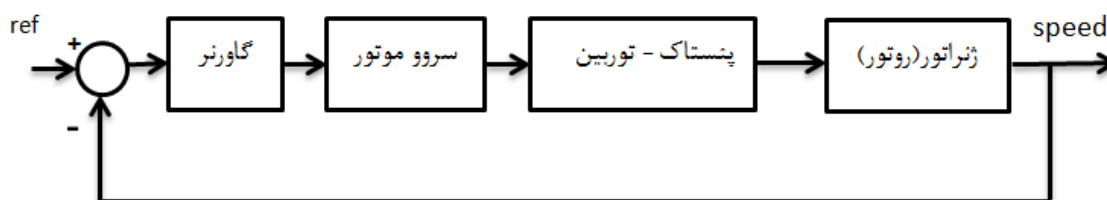
فصل دوم

مدلسازی

مقدمه

نقطه شروع طراحی کنترل فرآیند، شناخت آن و مدل‌سازی می‌باشد. دو روش اصلی به منظور مدل‌سازی فرآیند وجود دارد. برای سیستم با اجزاء مشخص و محدود از اصول فیزیکی حاکم بر اجزاء کمک گرفته و مدل ریاضی سیستم را بر اساس یک دسته معادله دیفرانسیل بیان می‌کنیم. بسیاری از فرآیندهای صنعتی دارای اجزاء متنوعی می‌باشند که مدل‌سازی تک‌تک این اجزاء زمان‌بر و پرهزینه خواهد بود. در این صورت از یک دسته آزمایشات ورودی و خروجی استفاده می‌گردد و مدل‌هایی را برای اینگونه سیستم‌ها در نظر گرفته و پارامترهای آن را شناسایی می‌کنیم. این روش شناسایی جعبه سیاه نامیده می‌شود [۶].

سیستم کنترل سرعت توربین شامل سیستم هیدرولیک، توربین، ژنراتور، سروموتور^۸ (جهت بستن دریچه) و گاورنر می‌باشد. بلوک دیاگرام کنترل سرعت توربین به شکل (۱-۲) است [۷].



شکل (۱-۲) بلوک دیاگرام سیستم کنترل سرعت توربین

۱-۲ مدل سیستم هیدرولیک

ابتدا با توصیف ضربه قوچ^۹ به مدل‌سازی سیستم هیدرولیک می‌پردازیم. ضربه قوچ یک پدیده حاصل از تغییر فشار در لوله‌های بسته است که به علت باز و بسته شدن یک شیر یا تغییر ناگهانی سرعت آب درون لوله یا هر عامل تغییر دهنده ناگهانی فشار به وجود می‌آید. در اثر این پدیده امواج فشاری به وجود می‌آیند که در لوله جلو عقب رفته تا زمانی که توسط اصطکاک داخل لوله از بین بروند. در حالتی که افت اصطکاکی در داخل لوله وجود نداشته

^۸ Servo motor

^۹ Water hammer

باشد این تغییرات نوسانی ادامه خواهند داشت و ممکن است باعث صدمه زدن به دیواره لوله شوند. ولی درحقیقت اصطکاک دیواره باعث میرا شدن این نوسانات می‌شود [۲]. آنالیز گذار در سیستم های هیدرولیکی به دو زیر سیستم تقسیم می‌شود. یکی پاسخ نوسان جرم و یکی پاسخ ضربه قوچ. معادلات دیفرانسیل معمولی مدل ریاضی نوسان جرم (تئوری ستون آب صلب) بین سد و تانک تعادل را توصیف می‌کنند و معادلات دیفرانسیل جزئی مدل ریاضی ضربه قوچ در طول پنستاک و لوله درافت را نشان می‌دهند. [۶]

نرخ تغییر جریان در پنستاک توسط معادله نرمالیزه شده زیر بیان می‌شود [۷-۲۰].

$$\frac{dQ}{dt} = (1 - \bar{H} - H_f) \frac{H_{base} g A}{L Q_{base}} \quad (1-2)$$

در این رابطه H_{base} ارتفاع استاتیک آب می‌باشد که برابر تفاضل تراز ارتفاع مخزن آب دریاچه از تراز ارتفاع پایاب می‌باشد. جریان یا دبی پایه Q_{base} برابر جریان توربین در حالتی است که پره های هادی کاملاً باز می‌باشند. تعریف T_w به عنوان ثابت زمانی اینرسی^{۱۰} آب یا زمان شروع آب به صورت زیر است:

$$T_w = \frac{L Q_{base}}{H_{base} g A} \quad (2-2)$$

می‌توان رابطه (۱-۲) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{(1 - \bar{H} - H_f)}{T_w} \quad (3-2)$$

$$f_p = \frac{L}{D} \times \frac{f}{2g} \times \frac{1}{A^2} \quad (4-2)$$

$$H_f = f_p Q^2 \quad (5-2)$$

^{۱۰} Inertia

\bar{H} ارتفاع آب روی توربین، H_f تلفات ارتفاع به دلیل اصطکاک، A سطح مقطع کانال، L طول کانال، D قطر کانال، f ضریب اصطکاک می باشد که از منحنی مربوط به ضرایب اصطکاک در لوله ها استخراج می شود [۹].

تابع تبدیل مربوط به ارتفاع و جریان در ورودی توربین به صورت زیر می باشد [۷]. اثبات این رابطه در ضمیمه آمده است.

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -\frac{T_w}{T_e} \left(1 + \frac{fQ_0}{2DAs}\right)^{1/2} \tanh\left((s^2 + s\frac{fQ_0}{2DA})^{1/2} T_e\right) \quad (۶-۲)$$

با صرف نظر از تلفات اصطکاک ($f=0$) رابطه زیر بدست می آید:

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -\frac{T_w}{T_e} \tanh(sT_e) \quad (۷-۲)$$

زمانی که موج فشاری در طول لوله پنستاک حرکت می کند تا به سطح آزاد آب برسد را با T_e بیان می کنیم که از رابطه (۲-۱۰) بدست می آید. در حالتی که ازدیاد فشار کم بوده و انبساط قابل ملاحظه ای در جداره ی خارجی

لوله ایجاد نشده باشد و آب نیز تراکم پذیر نباشد آنگاه $\tanh(sT_e) = sT_e$ [۹].

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -T_w s - H_f \quad (۸-۲)$$

با صرف نظر از تلفات اصطکاک معادله (۲-۸) به صورت زیر بدست می آید.

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -T_w s \quad (۹-۲)$$

$$T_e = \frac{L}{a} \quad (۱۰-۲)$$

که α سرعت موج فشار می باشد. جزئیات مربوط به محاسبات α در پیوست آمده است.

۲-۲ تانک تعادل^{۱۱}

پدیده‌های زود گذر هیدرولیک و تغییرات فشار از قبیل ضربه قوچ را می‌توان به طرق گوناگون کنترل نمود. روش اول استفاده از گاورنر می‌باشد. کنترل کننده‌های دریچه‌ها و گاورنر تنظیم کننده می‌توانند زمان بسته شدن شیر یا دریچه را به نحوی محدود کنند که در اثر افزایش فشار هیچ صدمه‌ای ایجاد نشود [۳] و [۹]. در این حالت شیرهای تنظیم کننده فشار که در نزدیک توربین جای داده شده اند مورد استفاده قرار می‌گیرند. شیر اطمینان می‌تواند به محفظه حلزونی شکل توربین متصل شده و توسط مکانیزم دریچه ورودی کنترل گردد. این کنترل به گونه‌ای صورت می‌گیرد که با ثابت نگه داشتن سرعت از افزایش فشار بیش از حد در پشت دریچه ورودی ممانعت به عمل می‌آورد. روش دوم استفاده از تانک تعادل (فشار شکن) می‌باشد [۲]. تانک تعادل لوله عمودی ایستاده‌ای هستند که به عنوان یک پیش مخزن یا کوتاه کننده مسیر، برای کنترل موج فشاری حاصل از ضربه قوچ عمل می‌کنند. یک تانک تعادل سه هدف را در نیروگاه دنبال می‌کند [۲]:

الف- کمک به پایداری جریان آب روی توربین

ب- کنترل ضربه قوچ یا تنظیم فشار

ج- کمک به کنترل سرعت توربین

از نقطه نظر عملی و به عنوان یک قاعده سرانگشتی باید گفت زمانی نیاز به تانک تعادل می‌باشد که مجموع طول لوله‌ها سه برابر ارتفاع سیستم باشد [۹]. از نظر اقتصادی تانک تعادل مقرون به صرفه نیست مگر آنکه بیشتر افت ارتفاع در نزدیکی توربین رخ دهد. انواع تانک تعادل در پیوست آمده است. تابع تبدیل نرخ جریان و فشار (ارتفاع) در تانک تعادل به صورت زیر است [۹]:

$$\frac{h(s)}{q(s)} = \frac{1}{sT_s} \quad (۱۱-۲)$$

زمان لازم برای پرشدن تانک را با T_s نمایش می‌دهیم.

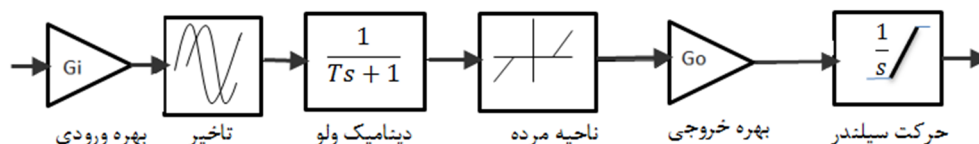
^{۱۱} Surge tank

$$T_s = \frac{A_s H_{base}}{Q_{base}} \quad (12-2)$$

سطح مقطع تانک تعادل A_s می‌باشد.

۲-۲ سرو موتور

مدل هیدرو الکتریکی سیستم راه‌انداز دریچه به شکل (۲-۲) است [۱۸].



شکل (۲-۲) بلوک دیاگرام راه‌انداز دریچه

این سیستم شامل ناحیه مرده، زمان مرده، دینامیک دریچه و گین‌های ورودی و خروجی دریچه می‌باشد از آنجائیکه دینامیک سیستم هیدرولیک راه‌انداز در مقایسه با کل سیستم کنترل سرعت توربین بسیار سریع می‌باشد می‌تواند به عنوان یک تابع درجه اول و یک محدودکننده تقریب زده شود [۱۸]. تابع تبدیل کلی سروموتور یک تابع درجه اول خطی است که با یک محدودکننده سری شده است مانند شکل (۲-۳).



شکل (۲-۳) تابع تبدیل سرو موتور

که U_a سیگنال کنترل می‌باشد و G موقعیت گیت است.

۲-۴ توربین

دینامیک توربین‌های هیدرولیکی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر پایداری نیروگاه‌های آبی دارند [۷]. توان تولیدی توربین تابعی است از جریان آب، زاویه پره‌های توربین و ارتفاع شبکه. جریان آب ورودی به توربین تابعی است از ارتفاع شبکه، سرعت گردش روتور، مقدار باز شدن دریچه و زاویه پره‌های توربین [۱۹-۲۱].

$$p = f_p(h, w, y, \phi) \quad (13-2)$$

$$q = f_q(h, w, y, \phi) \quad (14-2)$$

که در این رابطه h ارتفاع، w سرعت دورانی، y موقعیت دریچه و ϕ زاویه پره‌ها می‌باشد.

در توربین‌های با پره ثابت مانند توربین فرانسویس زاویه پره در نظر گرفته نمی‌شود. دینامیک‌های توربین بواسطه توان مکانیکی تولید شده وابسته به دینامیک‌های ژنراتور هستند. توان نامی تولید شده بوسیله توربین متناسب است با انرژی پتانسیل از دست رفته آب.

$$P_m = \eta q \gamma h \quad (15-2)$$

که P_m توان توربین، q جریان توربین، γ چگالی آب و η بازده توربین می‌باشد [۱۱]. از آنجائیکه بازده توربین صد در صد نیست جریان بدون بار از جریان واقعی کم می‌شود. یک تاثیر میرایی که وابسته به باز شدن دریچه می‌باشد نیز وجود دارد. بنابراین در هر شرایط باری توان تولیدی توربین می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۱۵-۱۸].

$$p_m = A_t h (q - q_{nl}) \eta - K_D (w_n - 1) y \quad (16-2)$$

y موقعیت دریچه، K_D ضریب میرایی توربین، q_{nl} جریان بی باری توربین و w_n سرعت نرمالیزه توربین می‌باشد.

ضریب تناسبی ثابت A_n از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸].

$$A_t = \frac{1}{h(q - q_{nl})} \frac{\text{turbine power (MW)}}{\text{generator MVA rating}} \quad (17-2)$$

اطلاعات جزئی در شرایط کاری مختلف که منجر به بازده‌های مختلف می‌شود توسط شرکت‌های سازنده ارائه می‌شود. با صرف نظر از تغییرات بازده توربین، معادله (۱۶-۲) به صورت معادله زیر نوشته می‌شود.

$$p_m = A_t h (q - q_{nl}) - K_D (w_n - 1) y \quad (18-2)$$

فشار و جریان آب در توربین با رابطه زیر توصیف می‌شوند [۸-۱۰].

$$q = y \sqrt{h} \quad (19-2)$$

۲-۵ مدل‌های غیرخطی توربین‌های هیدرولیکی:

۱- مدل غیرخطی ساده شده

۲- مدل غیرخطی توربین بدون تانک تعادل و با فرض ستون آب غیر ارتجاعی^{۱۲}

۳- مدل غیرخطی توربین بدون تانک تعادل و با فرض ستون آب ارتجاعی^{۱۳}

۴- مدل غیرخطی توربین با تانک تعادل و با فرض ستون آب غیر ارتجاعی در پنستاک و تونل خروجی

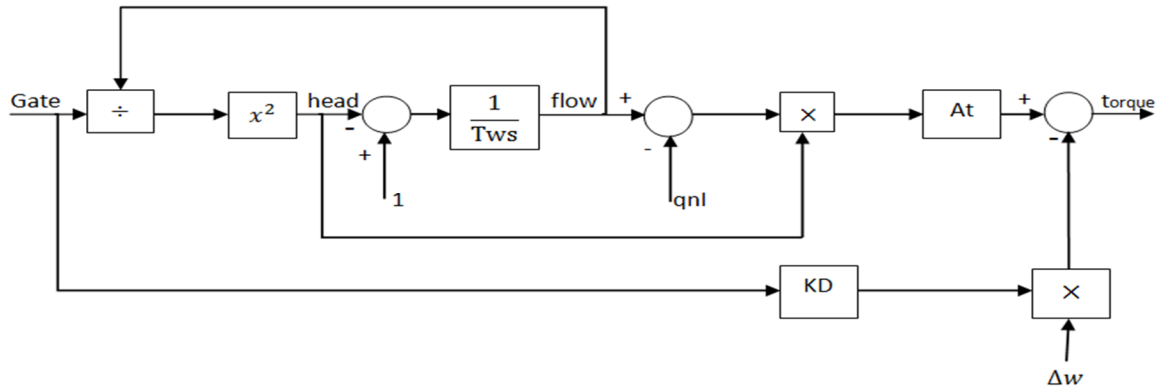
۵- مدل غیرخطی توربین با تانک تعادل و با فرض ستون آب ارتجاعی در پنستاک و تونل خروجی.

۲-۵-۱ مدل توربین غیرخطی ساده شده

مدل غیرخطی ساده شده بر پایه توربین هیدرولیکی ساده، طول پنستاک کم، ارتفاع و دهانه خروجی نامحدود، بدون تانک تعادل، پنستاک غیر ارتجاعی و آب تراکم‌ناپذیر مدل شده است. تابع تبدیل نرخ جریان آب و فشار آب در پنستاک با صرف نظر از تلفات اصطکاک با معادله (۲-۸) توصیف می‌شود. شکل (۲-۴) ویژگی‌های دینامیکی یک مدل غیرخطی ساده شده‌ی توربین را که با معادلات (۲-۸)، (۲-۱۷) و (۲-۱۸) توصیف شده است را نمایش می‌دهد. سیگنال ورودی این تابع تبدیل، موقعیت باز شدن دریچه و سیگنال خروجی گشتاور مکانیکی توربین می‌باشد [۸].

^{۱۲} Inelastic

^{۱۳} Elastic



شکل (۴-۲) مدل غیرخطی توربین ساده شده

۲-۵-۲ مدل غیرخطی توربین با فرض ستون آب غیر ارتجاعی

مدل غیرخطی توربین با فرض ستون آب غیر ارتجاعی بر اساس مدل ساده شده غیرخطی توصیف شده در

بخش ۲-۳-۱ می باشد. تلفات ارتفاع h_f متناسب است با توان دوم جریان آب و بستگی به ضریب اصطکاک کانال

دارد. تابع تبدیل مدل غیرخطی توربین بدون تانک تعادل با فرض ستون آب غیر ارتجاعی با معادلات (۲-۹)، (۲-۱۰)

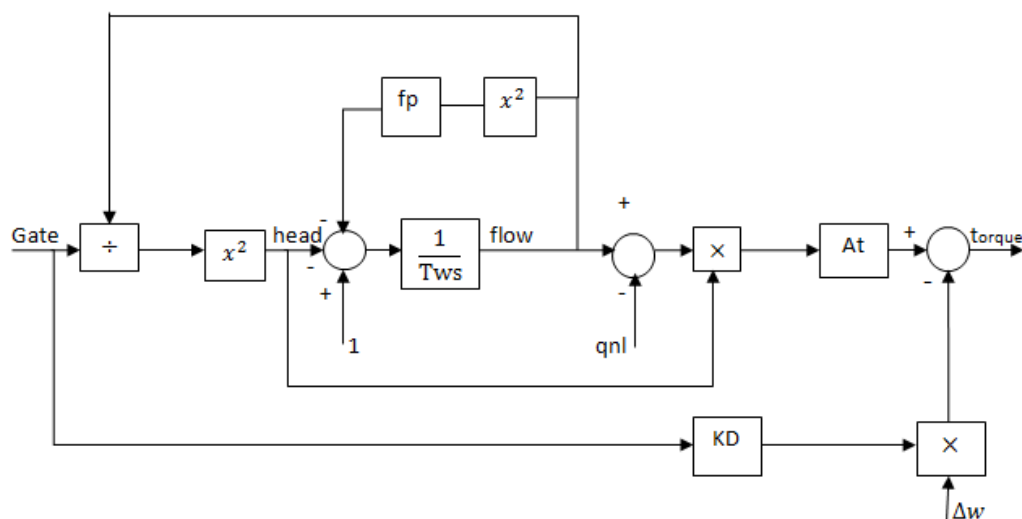
و (۲-۱۸) توصیف شده است. بلوک دیاگرام این معادلات در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.

این مدل برای نیروگاههای ارتفاع متوسط استفاده می شود زیرا در این نوع نیروگاهها به دلیل کم بودن ارتفاع

و در نتیجه کم بودن فشار، می توان آب را تراکم ناپذیر و لوله ها را غیر ارتجاعی فرض کرد [۸] و [۱۰]. همچنین

در نیروگاههای ارتفاع متوسط تانک تعادل کمتر مورد استفاده قرار می گیرد [۸]. در این پایان نامه از این مدل

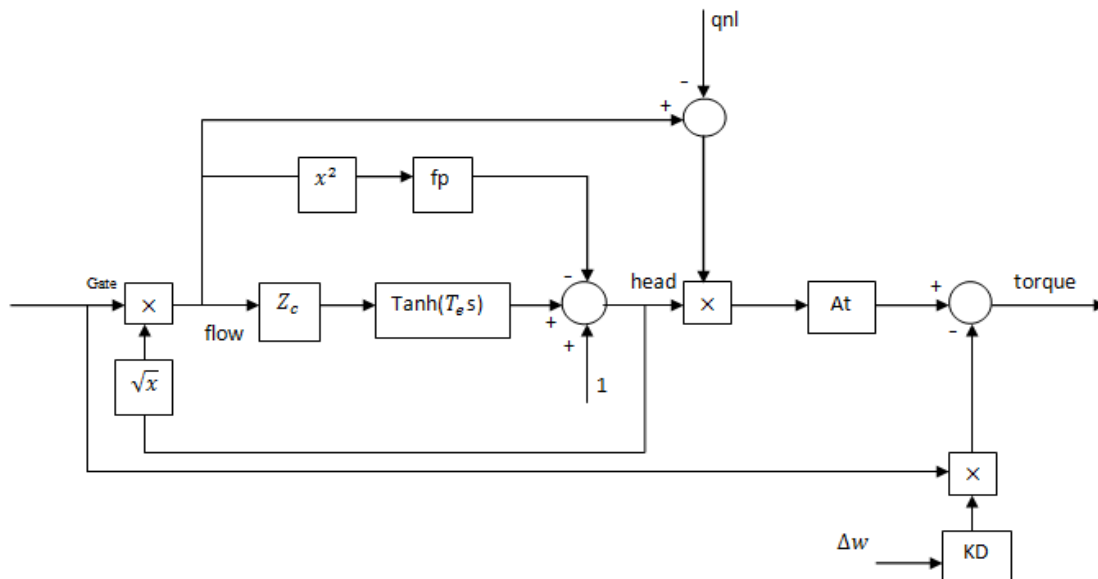
استفاده شده است.



شکل (۵-۲) مدل غیرخطی توربین بدون تانک تعادل با فرض ستون آب غیر ارتجاعی

۳-۵-۲ مدل غیرخطی بدون تانک تعادل با تاثیر ستون آب ارتجاعی

تاثیر مدل سازی ستون آب غیر ارتجاعی فقط مناسب پنستاک های با طول متوسط و کم می باشد. تاثیر موج سیال و زمان فشار سیال برای پنستاک با طول زیاد در نظر گرفته می شوند. پنستاک با در نظر گرفتن تئوری ضربه قوچ ارتجاعی می باشد و با نادیده گرفتن تلفات اصطکاک هیدرولیکی مدل شده است. حل معادله موج کلاسیک با در نظر گرفتن تئوری ضربه آب در معادله (۸-۲) توصیف شده است. وجود ضربه آب در پنستاک در اصطلاح ریاضی با یک تاخیر e^{-s^2T} در ساختار هیدرولیکی نمایش داده می شود [۸-۱۰]. تابع تبدیل مدل غیرخطی توربین بدون تانک تعادل و با در نظر گرفتن تاثیر ستون آب ارتجاعی از معادلات (۸-۲)، (۱۸-۲) و (۲-۱۹) بدست می آید. بلوک دیاگرام این روابط که توصیف کننده مدل غیرخطی توربین بدون تانک تعادل و با تاثیر ستون آب ارتجاعی می باشد در شکل (۶-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۶-۲) مدل غیرخطی توربین بدون تانک تعادل با تاثیر ستون آب غیر ارتجاعی

۲-۵-۴ مدل غیرخطی توربین با تانک تعادل و فرض آب غیر ارتجاعی

در نیروگاه‌های آبی با طول کانال زیاد از تانک تعادل برای جداسازی هیدرولیکی توربین از تغییرات ارتفاع ناشی از گذار هیدرولیکی استفاده می‌شود. مدل غیرخطی توربین با تانک تعادل و فرض آب غیر ارتجاعی بر اساس توربین ساده و تونل نزدیک به سد و پنستاک با طول زیاد به دست می‌آید. تونل نزدیک به سد و پنستاک با فرض آب تراکم ناپذیر و کانال سخت و با توجه به اینکه تاثیر فشار موج سیار نسبتا مهم نیست مدل شده اند. تلفات ارتفاع پنستاک و تونل نزدیک به سد متناسب با توان دوم جریان آب و ضرایب f_{p1} و f_{p2} می‌باشند. تابع تبدیل نرخ جریان آب و فشار آب در پنستاک با معادله (۲-۸) توصیف شده است. مدل هیدرولیکی تانک تعادل شامل یک اریفیس^{۱۴} است که با تلف کردن انرژی نوسانات هیدرولیکی باعث میرا شدن این نوسانات می‌شود. تلفات ارتفاع اوریفیس f_0 برابر نرخ جریان ضربدر قدر مطلق نرخ جریان می‌باشد. تابع تبدیل نرخ جریان نسبت به فشار آب در تانک تعادل در معادله (۲-۱۱) توصیف شده است. تابع تبدیل مدل غیرخطی توربین با تانک تعادل و فرض آب

^{۱۴} Orifice

آنالیز شده را با تغییر نقطه کار مشاهده نمود. ویژگی‌های غیرخطی توربین و تاثیر موج فشاری سیار در این مدل ها در نظر گرفته شده اند [۷] و [۸].

۲-۵-۶-۱ مدل خطی توربین با تانک تعادل و با فرض آب غیر ارتجاعی

از خطی سازی جهت تعیین پایداری سیستم حول نقطه کار استفاده می شود [۱۲]. همچنین با تغییر نقطه کار می توان دینامیک‌های سیستم را بررسی کرد. برای سنتز کنترلر نیز از روش خطی سازی حول نقطه کار به ازای تغییرات بسیار کوچک استفاده می شود [۱۸-۲۴].

$$\Delta m = \frac{\partial m}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial m}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial m}{\partial y} \Delta y \quad (20-2)$$

$$\Delta q = \frac{\partial q}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial q}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial q}{\partial y} \Delta y \quad (21-2)$$

مدل خطی توربین با تانک تعادل و با فرض آب غیر ارتجاعی بر پایه مدل توربین ساده با یک کانال نزدیک به سد و تانک تعادل و پنستاک می باشد. تونل نزدیک به سد و پنستاک با فرض تونل غیر ارتجاعی و مایع تراکم ناپذیر و با فرض اینکه تاثیر موج فشاری سیار بسیار ناچیز است مدل شده اند [۸]. تابع تبدیل انحراف جریان و انحراف فشار آب در دهانه خروجی تونل نزدیک به سد با استفاده از معادله (۲-۸) توصیف می شود. تابع تبدیل افزایش فشار آب به دلیل نرخ جریان در پنستاک با معادله زیر بیان می شود [۹].

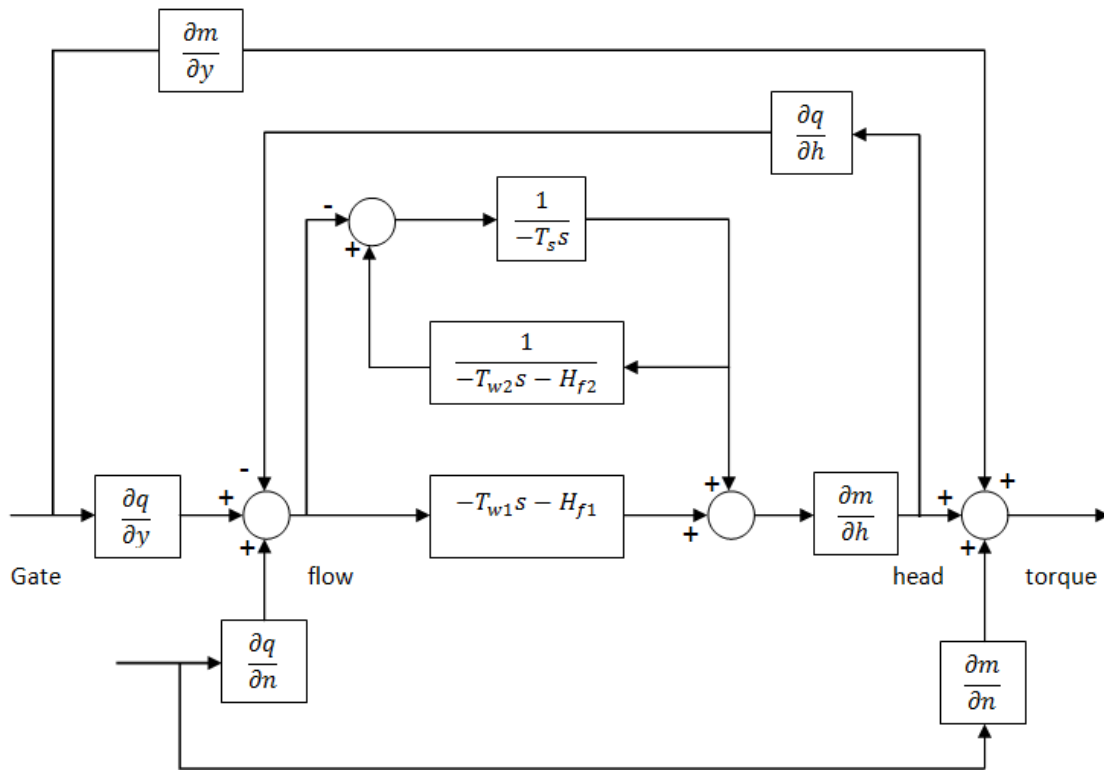
$$(T_{w2s} + H_{f2})q_2 = -(h_2 - h_1) \quad (22-2)$$

اندیس ۱ مربوط به تونل نزدیک به سد و اندیس ۲ مربوط به پنستاک است.

تابع تبدیل نرخ جریان آب و فشار آب در تانک تعادل با نادیده گرفتن تلفات هیدرولیکی در اریفیس با معادله (۲-۱۱) توصیف می شود. مدل ریاضی توربین فرانسوی برای تغییرات کوچک حول نقطه کار با معادلات (۲-۲۰) و (۲-۲۱) نمایش داده می شود.

برای بدست آوردن ویژگی‌های غیرخطی شش مرحله از مدل آزمایشی مشتق گرفته می شود. ضرایب خطی سازی توربین برای هر نقطه کاری بستگی به سرعت توربین، ارتفاع فشاری، و موقعیت دریچه دارد. معادلات (۲-۸)، (۲-۲)، (۲-۲۰)، (۲-۲۱) و (۲-۲۲) تابع تبدیل انحراف گشتاور مکانیکی توربین نسبت به موقعیت دریچه را بیان می

کنند. در شکل (۹-۲) بلوک دیاگرام مدل خطی توربین با تانک تعادل و با فرض آب غیر ارتجاعی نمایش داده شده است.



شکل (۹-۲) مدل خطی توربین با تانک تعادل و با فرض آب غیر ارتجاعی

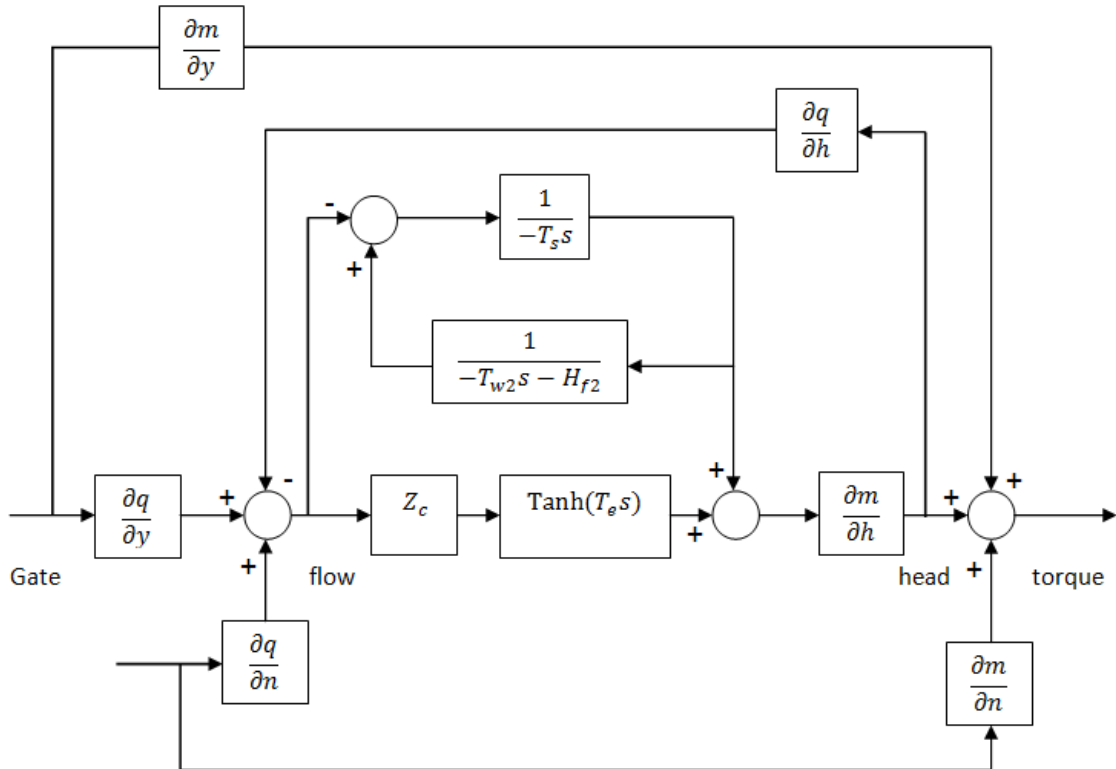
۲-۶-۵-۲ مدل خطی توربین با تانک تعادل با فرض ستون آب ارتجاعی در پنستاک

مدل خطی توربین با تانک تعادل با فرض ستون آب ارتجاعی در پنستاک برپایه توربین ساده، یک تونل نزدیک به سد، تانک تعادل و یک پنستاک می باشد. تونل نزدیک به سد دارای کانال غیرارتجاعی بوده و مایع نیز تراکم ناپذیر است. تابع تبدیل انحراف جریان آب و انحراف فشار آب در دهانه خروجی کانال نزدیک به سد با معادله (۸-۲) توصیف می شود. تابع تبدیل جریان و فشار آب داخل پنستاک با رابطه زیر بیان می شود [۷].

$$\left(\frac{T_{w2}}{T_e} \tanh(sT_e) \right) q_2 = (h_2 - h_1) \quad (۲۳-۲)$$

اندیس ۱ مربوط به تونل نزدیک به سد و اندیس ۲ مربوط به پنستاک است.

معادلات (۲-۸)، (۲-۱۱)، (۲-۲۰)، (۲-۲۱) و (۲-۲۳) تابع تبدیل انحراف گشتاور نسبت به مقدار باز شدن دریچه را در مدل توربین خطی شده با تانک تعادل با فرض ستون آب ارتجاعی در پنستاک را توصیف می کنند. در شکل (۲-۱۰) مدل خطی توربین با تانک تعادل با فرض ستون آب ارتجاعی در پنستاک نمایش داده شده است.



شکل (۲-۱۰) مدل خطی توربین با تانک تعادل با فرض ستون آب ارتجاعی در پنستاک

۲-۶ مدل دینامیکی ژنراتور (روتور)

تولید کننده‌های توان الکتریکی نیروگاه را ژنراتورهای سنکرون تشکیل می‌دهند. هر چند که ژنراتورهای القایی با توان کم (چند صد کیلو وات تا چند مگا وات) در کشورهای زیادی در حال کار هستند. لیکن این واحدها در تامین برق نیروگاه عموماً نقش جنبی دارند.

مشخصات عملکرد ژنراتور آبی تحت شرایط تغییرات ناگهانی و نیز قطع ناگهانی بار تابعی از مشخصات کارکرد توربین هیدرولیکی، نحوه تنظیمات سامانه گاورنر آن واحد و میزان کل مقدار ممان چرخش روتور با احتساب اثر چرخ طیار مربوط به توربین می‌باشد، که با استفاده از ثابت اینرسی روتور ژنراتور و توربین محاسبه می‌شود. مقدار ثابت اینرسی تابعی از دور، شعاع و ممان چرخش روتور و قدرت اسمی ژنراتور می‌باشد. اثر چرخ طیار و مقدار ثابت اینرسی مجموعه در هنگام تغییرات ناگهانی بار شبکه به حفظ پایداری سامانه برق کمک می‌نماید و به گاورنر امکان می‌دهد تا سرعت واحد را کنترل کند، لذا در طراحی ژنراتورها باید میزان آن با توجه به سرعت و شرایط کارکرد واحد بررسی و تعیین شود [۳].

دینامیک روتور در سیستم کنترل سرعت در بیشتر مواقع می‌تواند با استفاده از مقدار ممان اینرسی توصیف شود. با استفاده از قانون دوم نیوتن که گشتاور برابر است با توان تقسیم بر سرعت دورانی، داریم [۱۸]:

$$\dot{W}_n = \frac{1}{W_n T_m} (p - p_{el}) \quad (24-2)$$

$$T_m = \frac{J_m W_B^2}{P_B} \quad (25-2)$$

که در آن P توان مکانیکی شفت توربین، P_{el} توان الکتریکی ژنراتور (مصرف داخلی نیروگاه)، P_B توان پایه، J_m ممان اینرسی، W_n سرعت نرمالیزه شده، W_B سرعت پایه و T_m ثابت زمانی مکانیکی می‌باشد.

تأثیر توان الکتریکی در روتور می‌تواند به عنوان یک اغتشاش در نظر گرفته شود [۱۳]. با فرض اینکه در نقطه کار توربین توان توربین و ژنراتور با هم برابر بوده و سرعت توربین نامی باشد دینامیک خطی روتور به صورت زیر مدل می‌شود [۱۸].

$$\frac{\Delta W_n}{\Delta P - \Delta P_l} = \frac{1}{T_m s + D_p} \quad (26-2)$$

در رابطه فوق P_l تغییرات بار و D_p ضریب میرایی شبکه الکتریکی می‌باشد. مقدار نوعی D_p بین ۰/۵ و ۲/۵ می‌باشد [۱۸].

۷-۲ گاورنر

گاورنر یکی از تجهیزات کلیدی نیروگاه است. معمولاً کار گاورنر با رله‌های حفاظتی، قسمت کنترل سامانه تحریک، پمپ‌های روغن کاری تجهیزات، سامانه ترمز ژنراتور، دستگاه سنکرون کننده و کلید قدرت هماهنگ می‌گردد [۳].

سرعت و توان تولیدی توربین آبی از طریق تنظیم جریان ورودی به آن تنظیم می‌گردد. سامانه گاورنر وظیفه تنظیم جریان آب ورودی توربین را به منظور ثابت نگه داشتن سرعت واحد و فرکانس سامانه به عهده دارد. همچنین گاورنر مقدار آب ورودی را با توجه به قدرت الکتریکی مورد نیاز سامانه و ارتفاع موثر آب تنظیم می‌کند [۲].

در صورتی که نیروگاه به یک شبکه محدود (شبکه ایزوله) متصل باشد، گاورنر واحد، فرکانس را کنترل می‌کند. در صورتی که یک واحد به شبکه تولید و انتقال بزرگی وصل باشد، گاورنر آن فرکانس واحد را با فرکانس شبکه بزرگ، برای سنکرون کردن تطبیق می‌دهد، و یا ممکن است در کنترل فرکانس شبکه ایفای نقش کند. چنانچه ظرفیت یک واحد در مقایسه با کل قدرت تولیدی در شبکه سراسری بسیار کوچک باشد، چنین واحدی نمی‌تواند در کنترل فرکانس شبکه نقش قابل توجهی داشته باشد، در این حالت گاورنر با امکانات کنترل پیچیده مورد نیاز نمی‌باشد و بجای آن یک عملگر مرتبط با مکانیزم کنترل کننده دریاچه‌های تنظیم کننده آب توربین نصب می‌شود که با توجه به توان مورد نیاز، مقدار دبی آب را تنظیم می‌کند. در این حالت دستگاه سنکرون کننده فرمان عملگر را طوری صادر می‌کند که سرعت قبل و در حین سنکرون کردن کنترل شود [۳].

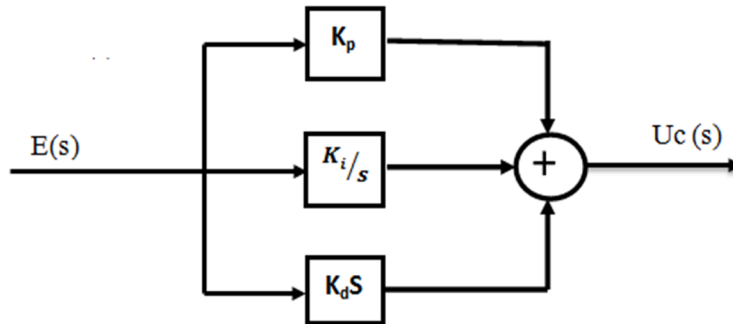
به طور کلی سامانه گاورنر از سه بخش اصلی به شرح زیر تشکیل می‌شود:

- بخش حس کننده سرعت: این بخش تغییرات سرعت توربین را حس می‌کند و میزان گشودگی دریاچه‌های

توربین را متناسباً برای حفظ سرعت مورد نظر برای توربین (مقدار مرجع) تغییر می‌دهد.

- بخش کنترل کننده: این بخش که سرعت توربین را با سرعت دلخواه تنظیم شده برای آن مقایسه و یک سیگنال کنترلی خروجی تولید می‌کند که نشان دهنده عملکرد کنترلی مورد نیاز است.
- بخش بزرگ کننده قدرت: این بخش نیروی مکانیکی لازم برای تغییر موقعیت دستگاه‌های تنظیم کننده جریان آب ورودی به انواع مختلف توربین را، در پاسخ به سیگنال خروجی بخش کنترل تامین می‌کند.
- مکانیزم سرتویی گاورنرهای مکانیکی، قدیمی‌ترین وسیله حس کردن سرعت است که شامل دو وزنه در انتهای دو بازو می‌باشد. در این مکانیزم افزایش سرعت واحد باعث افزایش نیروی گریز از مرکز وزنه‌ها شده و میله سرعت دهنده را به طرف بالا بلند می‌کند.
- در گاورنرهای مدرن‌تر سرعت توربین توسط سیگنال فرکانس خروجی از یک وسیله حس کننده، که در بالای ژنراتور و روی محور نصب می‌شود، اندازه‌گیری می‌گردد. فرکانس خروجی متناسب با سرعت می‌باشد. این روش برای سامانه کنترل کننده گاورنرهای الکتریکی نوع آنالوگ یا دیجیتال متناسب می‌باشد.
- بخش کنترل گاورنر شامل تجهیزاتی است که سیگنالهای خارجی نظیر سرعت، موقعیت دریچه‌های تنظیمی و قدرت را دریافت و بر اساس آن فرامین لازم را به بخش بزرگ کننده قدرت گاورنر صادر می‌کند. مهمترین اختلاف بین گاورنرهای مکانیکی-الکترو هیدرولیکی و گاورنرهای الکترونیکی-هیدرو الکتریکی در اجزای کنترلی آنها می‌باشد [۲].
- نیروی عمل کننده سرتویی گاورنر مکانیکی، یا خروجی وسایل حس کننده الکترونیکی در گاورنر آنالوگ یا دیجیتال برای حرکت دادن مکانیزم کنترل جریان آب توربین کافی نیست. در توربین‌های بزرگ نیروی بسیار زیادی برای حرکت دادن سروموتور لازم است. این کار در چندین مرحله با افزایش نیروی هیدرولیکی مابین ترانسدیوسر و سروموتور انجام می‌گیرد. معمولاً سروموتور روغنی همراه با مخزن روغن تحت فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کنترل کننده PID^{۱۵} در سامانه های گاورنر آنالوگ یا دیجیتال برای کنترل سرعت استفاده می شود. ساختار این کنترل کننده در شکل (۱۱-۲) نمایش داده شده است. و رابطه (۲۷-۲) تابع تبدیل ورودی خروجی این کنترل کننده را نشان می دهد.



شکل (۱۱-۲) ساختار کنترل کننده PID

$$U_c(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s \right) E(s) \quad (۲۷-۲)$$

که در این رابطه K_p بهره تناسبی، K_i بهره انتگرالی، K_d بهره مشتقگیر، U_c خروجی کنترل کننده (سیگنال کنترل) و E خطای سیستم می باشد. بهره تناسبی عموماً برای بهبود پاسخ گذراست. از طرفی می تواند تاثیر اغتشاش را بر روی خروجی تضعیف نماید. تاثیر اصلی ترم انتگرال گیر کاهش خطای ماندگار می باشد. این بدان معناست که پس از گذشت زمان گذرا پاسخ سیستم به مقدار مطلوب نزدیک گردیده و خطای ماندگار کاهش می یابد. اضافه نمودن ترم مشتق گیر به کنترل کننده به دو منظور صورت می پذیرد: افزایش حاشیه پایداری در سیستم حلقه بسته و افزایش سرعت پاسخ سیستم [۶].

^{۱۵} Proportional, Integral, Derivative

تنها قدم در پیاده سازی کنترل کننده PID تعیین ضرایب کنترل کننده می‌باشد. برای تعیین ضرایب کنترل کننده تا کنون روشهای زیادی استفاده شده است که متداولترین آنها روش زیگلر- نیکلز است. با توجه به وجود نامعینی‌ها در مدل سیستم و نامینیمم فاز بودن آن [۱۲-۲۴]، تنظیم ضرایب PID به روشهای متداول امری دشوار بوده و برای تنظیم دقیقتر این ضرایب از الگوریتم‌های هوشمند در این پایان‌نامه استفاده می‌شود.

فصل سوم

الگوریتم‌های

تکاملی

۳-۱ الگوریتم ژنتیک

ایده اصلی الگوریتم‌های تکاملی در سال ۱۹۶۰ توسط رچنبرگ^{۱۶} مطرح گردید. الگوریتم ژنتیک که منشعب از این نوع الگوریتم‌ها است، در حقیقت روش جستجوی کامپیوتری بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی و براساس ساختار ژن‌ها و کروموزوم‌ها^{۱۷} است که توسط پروفیسور هالند^{۱۸} در دانشگاه میشیگان مطرح شد و پس از وی توسط جمعی از دانشجوینانش توسعه یافت [۲۶].

الگوریتم ژنتیک بر اساس تئوری تکاملی داروین می‌باشد و جواب مسأله‌ای که از طریق الگوریتم ژنتیک حل می‌شود مرتباً بهبود می‌یابد. الگوریتم ژنتیک با یک مجموعه از جوابها که از طریق کروموزومها نشان داده می‌شوند شروع می‌شود. این مجموعه جوابها جمعیت اولیه نام دارند. در این الگوریتم جوابهای حاصل از یک جمعیت برای تولید جمعیت بعدی استفاده می‌شوند. در این فرآیند امید است که جمعیت جدید نسبت به جمعیت قبلی بهتر باشد. انتخاب بعضی از جوابها از میان کل جوابها (والدین) به منظور ایجاد جوابهای جدید یا همان فرزندان بر اساس میزان مطلوبیت آنها می‌باشد. طبیعی است که جوابهای مناسبتر شانس بیشتری برای تولید مجدد دارند. این فرآیند تا برقراری شرطی که از پیش تعیین شده است (مانند تعداد تکرار یا میزان بهبود جواب) ادامه می‌یابد [۱۵]. شمای کلی الگوریتم ژنتیک به صورت زیر می‌باشد [۲۶-۲۹]:

(۱) تولید جمعیت تصادفی شامل n کروموزوم.

(۲) بررسی تابع مطلوبیت هر کروموزوم در جمعیت.

(۳) ایجاد یک جمعیت جدید بر اساس تکرار قدمهای زیر

۳-۱) انتخاب دو کروموزوم والد از یک جمعیت بر اساس میزان مطلوبیت آنها

^{۱۶} Rechenberg

^{۱۷} Chromosome

^{۱۸} Holland

۲-۳) در نظر گرفتن مقدار مشخصی برای احتمال اعمال عملگر تقاطعی و سپس انجام عملیات ترکیب بر روی والدین به منظور ایجاد فرزندان.

۳-۳) در نظر گرفتن احتمال جهش و سپس تغییر فرزندان

۴-۳) جایگزینی فرزندان جدید در جمعیت جدید.

۴) استفاده از جمعیت جدید برای اجراهای بعدی الگوریتم

۵) توقف اجرای الگوریتم در صورت مشاهده شرایط توقف و برگرداندن بهترین جواب در جمعیت فعلی.

۶) رفتن به قدم ۲

اگر جمعیت جدید تنها از طریق فرزندان جدید ایجاد شود، این فرآیند منجر به حذف بهترین کروموزومهای نسل قبل می‌گردد. برای جلوگیری از این پیشامد، همیشه بهترین جواب نسل قبل را بدون هیچ تغییری به نسل جدید منتقل می‌کنیم.

اگر تعداد کروموزومها خیلی کم باشد، امکان شکل‌گیری عملیات جابجایی توسط الگوریتم ژنتیک بسیار کم خواهد بود و تنها قسمت کمی از فضای جستجو مورد کاوش قرار خواهد گرفت. از طرف دیگر اگر تعداد کروموزومها خیلی زیاد باشد، الگوریتم بسیار کند خواهد شد. بعضی تحقیقات نشان می‌دهد که اندازه جمعیت باید بر اساس نوع مسأله و کدینگ آن تعریف شود و افزایش بیشتر آن بی‌فایده خواهد بود و هرگز به حل سریعتر مسأله کمک نمی‌کند [۲۸].

تحقیقات نشان داده‌اند که همگرایی به سمت بهینه مطلق یک خاصیت ذاتی الگوریتم ژنتیک نمی‌باشد ولی با رعایت شرایط خاص امکان‌پذیر است. آنالیزهای ریاضی انجام شده در قالب چندین قضیه و با استفاده از مدل زنجیره مارکوف، نشان داده است که چنانچه در هر مرحله تولید از الگوریتم ژنتیک، بهترین جوابها نگه داشته شوند و با احتمال یک به مرحله بعد وارد شوند، الگوریتم به سمت بهینه مطلق همگرا می‌شود [۲۹].

عوامل متعددی در سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیک موثرند. جمعیت اولیه، مقادیر احتمال جهش و جابجایی، چگونگی عمل جابجایی و جهش، تابع برآزندگی و چگونگی انتخاب جمعیت مرحله بعد از جمله این عوامل می- باشند. چگونگی تاثیر این عوامل در سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیک، به مسأله مورد نظر بستگی دارد و از طریق آزمایش بدست می آید [۲۵].

۳-۲ الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات

جیمز کندی^{۱۹}، روانشناس اجتماعی، و راسل ایرهارت^{۲۰}، مهندس برق، صاحبان اصلی ایده الگوریتم PSO^{۲۱} می باشند. آنها از مدل‌های اجتماعی و روابط موجود اجتماعی نوعی از هوش محاسباتی را به وجود آوردند. در الگوریتم PSO، تعدادی از موجودات وجود دارند که آنها را ذره می نامیم و در فضای جستجوی تابعی که قصد بهینه کردن آن را داریم، پخش شده اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی اش و بهترین محلی که قبلاً در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می کند. همه ذرات جهتی را برای حرکت انتخاب می کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می رسد. این مراحل چندین بار تکرار می شوند تا آنکه جواب مورد نظر بدست بیاید. در واقع انبوه ذرات که بهینه یک تابع را جستجو می کنند، همانند دسته ای از پرندگان عمل می کنند که به دنبال غذا می گردند. هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار d بعدی تشکیل شده است که d بُعد فضای جستجو می باشد. برای ذره i ام این سه بردار عبارتند از x^i موقعیت فعلی ذره، v^i سرعت حرکت ذره و $x^{i,best}$ بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده است. x^i مجموعه ای از مختصات است که موقعیت فعلی ذره را نمایش می دهد. در هر مرحله ای که الگوریتم تکرار می شود، x^i به

^{۱۹} James Kennedy

^{۲۰} Russel C. Eberhart

^{۲۱} Particle swarm optimization

عنوان یک جواب برای مسأله محاسبه می‌شود [۳۴]. اگر این موقعیت بهتر از جوابهای پیشین باشد، در $x^{i,best}$ ذخیره می‌شود. f^i مقدار تابع هدف در x^i و $f^{i,best}$ تابع هدف در $x^{i,best}$ است که هر دو از عناصر تشکیل دهنده هر ذره به حساب می‌آیند. ذخیره کردن مقدار $f^{i,best}$ برای انجام مقایسه های بعدی، ضروری است. اما ذخیره کردن مقدار f^i ضروری نمی‌باشد. در هر تکرار x^i و v^i جدیدی بدست می‌آیند و طبعاً منظور از اجرای الگوریتم، بهتر کردن $x^{i,best}$ و احتمالاً x^i است. بهترین موقعیتی که توسط همه ذرات پیدا شده است، به صورت $x^{g,best}$ نشان داده می‌شود که با مقایسه مقادیر همه ذرات و از میان $x^{i,best}$ ها انتخاب می‌شود. مقدار تابع هدف در $x^{g,best}$ به صورت $f^{g,best}$ نشان داده می‌شود. در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله $t+1$ ام از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله ی قبلی ساخته می‌شوند [۱۶]. اگر منظور از z_j مولفه ی z ام از بردار z باشد، آنگاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارتند از [۳۰-۳۷]:

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + c_1r_1(x_j^{i,best}[t] - x_j^i[t]) + c_2r_2(x_j^{g,best}[t] - x_j^i[t]) \quad (1-3)$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (2-3)$$

در این روابط w ضریب اینرسی، r_1 و r_2 اعدادی تصادفی در بازه $[0, 1]$ با توزیع یکنواخت، و همچنین c_1 و c_2 ضرایب یادگیری هستند. r_1 و r_2 باعث می‌شوند که نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کامل‌تری روی فضا انجام پذیرد. c_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c_2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع می‌باشد. از معادله (۱-۳) می‌توان به این نتیجه رسید که هر ذره به هنگام حرکت، (۱) جهت حرکت قبلی خود، (۲) بهترین موقعیتی را که در آن قرار گرفته داشته است و (۳) بهترین موقعیتی را که توسط کل جمع تجربه شده است، در نظر می‌گیرد.

ضریب اینرسی w بر روی همگرایی الگوریتم PSO تاثیر مستقیم دارد. در واقع می‌توان به واسطه ضریب اینرسی، تاثیر سرعت‌های گذشته را بر سرعت‌های زمان حال کنترل نمود. می‌توان برای برقراری موازنه‌ی بهتر میان جستجوی سراسری و جستجوی محلی مقدار w را تغییر داد. مقدار زیاد برای w باعث می‌شود که ذرات موجود

در الگوریتم، به جستجوی مناطق جدیدتر روی بیابان و یک جستجوی سراسری را انجام دهند. در مقابل یک مقدار کم برای w باعث می‌شود که ذرات در منطقه‌ی محدودی بمانند و در واقع یک جستجوی محلی را انجام دهند. جستجوی محلی برای دقیق‌تر کردن جواب‌های فعلی مناسب است و جستجوی سراسری برای یافتن جواب‌های بهتری که احتمالاً در جاهای ناشناخته از فضای جستجو وجود دارند به کار می‌رود [۳۴]. بنابراین برای آنکه جستجوی سراسری و جستجوی محلی را داشته باشیم ابتدا مقدار w را بین دو مقدار در نظر می‌گیریم سپس به صورت خطی یا غیرخطی مقدار w را از بیشترین مقدار تا کمترین مقدار کم می‌کنیم. تغییرات w طبق رابطه (۳-۳) می‌باشد [۳۵-۳۰]. این رابطه تغییرات خطی اینرسی را نمایش می‌دهد [۳۳-۳۰].

$$w^t = w_{\min} + \frac{\text{iter}_{\max} - t}{\text{iter}_{\max}} (w_{\max} - w_{\min}) \quad (3-3)$$

که در رابطه بالا iter_{\max} بیشترین مقدار تکرار، t شماره تکرار فعلی، w_{\max} بیشترین مقدار ضریب اینرسی، w_{\min} کمترین مقدار ضریب اینرسی، w^t مقدار ضریب اینرسی در تکرار فعلی می‌باشد. رابطه (۴-۳) تغییرات ضریب اینرسی را به صورت غیرخطی نشان می‌دهد [۳۱].

$$w^t = w_{\text{init}}(u^{-t}) \quad (4-3)$$

در رابطه بالا $w_{\text{init}} \in [0,1]$ مقدار اولیه ضریب اینرسی و $u \in [1.0001, 1.005]$ می‌باشد [۳۱].

فصل چهارم

شپیه‌سازی

نیروگاه

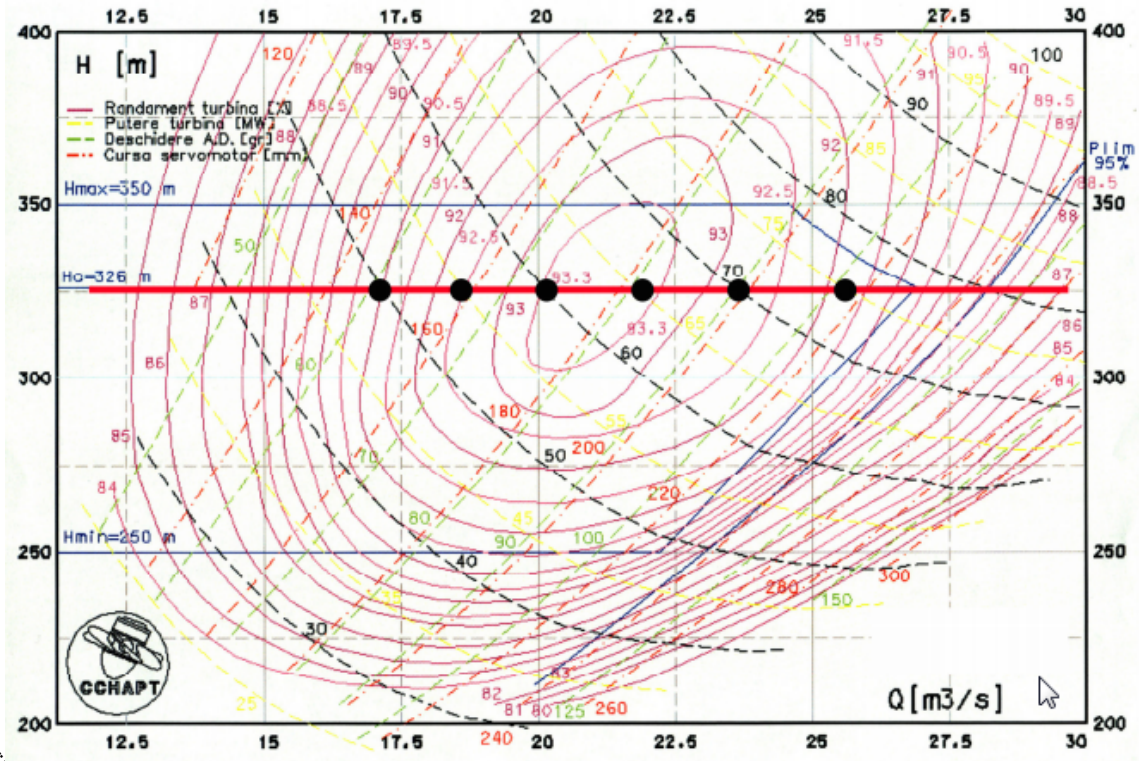
۴-۱ شبیه سازی مدل خطی شده توربین

مدل خطی شده توربین برای اثبات پایداری توربین حول نقطه کار و همچنین برای طراحی کنترل کننده در نقطه کار استفاده می‌شود [۱۲]. با تغییر نقطه کار و محاسبه ضرایب خطی سازی جدید دینامیک‌های مختلف سیستم را بررسی می‌نمایند. برای سنتز کنترل کننده، سیستم را در نقاط کار مختلف خطی کرده و کنترل کننده را آزمایش می‌نمایند.

برای خطی سازی توربین، مشتقات جزئی جریان آب و گشتاور را نسبت به ارتفاع، سرعت چرخشی و مقدار باز شدگی دریچه را محاسبه می‌کنیم که به این مشتقات جزئی ضرایب توربین می‌گویند [۱۸]. در واقع این ضرایب ویژگی‌های غیرخطی توربین را نشان می‌دهند. مشتقات جزئی با مقدار بازشدگی دریچه و سرعت چرخشی به شدت تغییر می‌کنند. تاثیر ضرایب توربین در دقت مدلسازی حیاتی می‌باشد. ضرایب توربین حول نقطه کار از منحنی هیل^{۲۲} و با استفاده از درونیابی استخراج می‌شوند. جدول (۴-۱) مشتقات جزئی توربین را نمایش می‌دهد. مقادیر استاندارد ضرایب توربین با فرض توربین ایده‌آل (بدون تلفات) در بار نامی در سه شرایط مختلف در جدول (۴-۲) نمایش داده شده‌اند. برای بدست آوردن مقادیر دقیق ضرایب حتماً باید از منحنی هیل استفاده نماییم. شکل (۴-۱) یک نمونه منحنی هیل را نمایش می‌دهد.

همانطور که در شکل مشخص است محور عمودی ارتفاع روی توربین و محور افقی مقدار دبی آب را نمایش می‌دهند دوایر پرنگ نشان دهنده راندمان می‌باشند.

²² Hill chart



شکل (۴) -

(۱) منحنی هیل [۱۶]

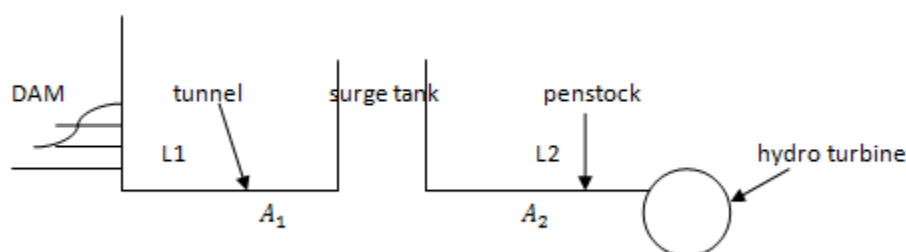
جدول (۴-۱) مشتقات جزئی توربین [۹]

مشتقات جزئی	مدل IEEE [۱۰]
$\frac{\partial q}{\partial h}$	$\frac{y}{2\sqrt{h}}$
$\frac{\partial q}{\partial w}$	0.0
$\frac{\partial q}{\partial y}$	\sqrt{h}
$\frac{\partial m}{\partial h}$	$A_t \left(\frac{3}{2} y \sqrt{h} - q_{nl} \right)$
$\frac{\partial m}{\partial w}$	$-y D_a$
$\frac{\partial m}{\partial y}$	$A_t h^{3/2} - D_a (w_N - 1)$

جدول (۲-۴) ضرایب توربین ایده‌آل در شرایط کاری مختلف [۹]

مشتقات جزیی	شرایط کاری ژنراتور			مدل IEEE
	۲۲/۵ MW	۸۴/۳ MW	۱۱۲ MW	
$\frac{\partial q}{\partial h}$	۰/۰۶	۰/۲۰	۰/۲۴	۰/۵۰
$\frac{\partial q}{\partial w}$	۰/۱۳	۰/۳۸	۰/۶۲	۰/۰
$\frac{\partial q}{\partial y}$	۰/۸۰	۰/۴۰	۰/۳۸	۱/۰۰
$\frac{\partial m}{\partial h}$	۰/۴۰	۱/۲۰	۱/۵۰	۱/۵۰
$\frac{\partial m}{\partial w}$	-۰/۳۹	-۰/۸۶	-۰/۷۵	۰۰/۰۰
$\frac{\partial m}{\partial y}$	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۳۴	۱/۰۰

در ادامه یک مدل خطی شده را انتخاب کرده و الگوریتم‌های بهینه‌سازی انبوه ذرات و ژنتیک را برای ضرایب بهینه کنترل کننده تناسبی، مشتقی، انتگرالی PID به کار می‌گیریم. در این مدل خطی شده نیروگاه شامل تانک تعادل نیز می‌باشد. ضرایب خطی سازی و مشخصات نیروگاه به شرح زیر می‌باشند [۲۱].



شکل (۲-۴) دیاگرام نیروگاه آبی با یک تانک تعادل

سطح مقطع پنستاک ۴۹ متر مربع، سطح مقطع تانک تعادل ۱۱۳ متر مربع، طول پنستاک ۴۷۰ متر، طول کانال ۹۳۸ متر، دبی جریان آب ۵۳/۵ متر مکعب، ضریب اصطکاک تونل ۰/۰۳۶، ضریب اصطکاک پنستاک ۰/۰۲۷،

ثابت زمانی ژنراتور ۸/۱۳ ثانیه، ثابت زمانی کانال ۳/۳۱۲ ثانیه، ثابت زمانی پنستاک ۱/۲۴۴ ثانیه و ثابت زمانی تانک تعادل ۶۵۹/۲۴۴ ثانیه می‌باشد. ضرایب توربین نیز به شرح جدول (۳-۴) می‌باشند.

جدول (۳-۴) ضرایب توربین برای نیروگاه شبیه سازی شده [۲۱]

$e_x = \frac{\partial m}{\partial w}$	$e_y = \frac{\partial m}{\partial y}$	$e_h = \frac{\partial m}{\partial h}$	$e_{qx} = \frac{\partial q}{\partial w}$	$e_{qy} = \frac{\partial q}{\partial y}$	$e_{qh} = \frac{\partial q}{\partial h}$	مشتقات جزئی
-۰/۲۶	۰/۳۲۲	۰/۷۲۲	۰۰/۰۰	۰/۵۷۳	۰/۳۲۵	مقدار

بلوک دیاگرام شبیه سازی شده نیروگاه شامل سیستم هیدرولیک، ژنراتور، سرو موتور و کنترل کننده PID می‌باشد. تابع تبدیل غیرخطی ژنراتور رابطه (۲-۲۶) می‌باشد و رابطه (۴-۱) نیز بیانگر یک سرو موتور خطی شده می‌باشد.

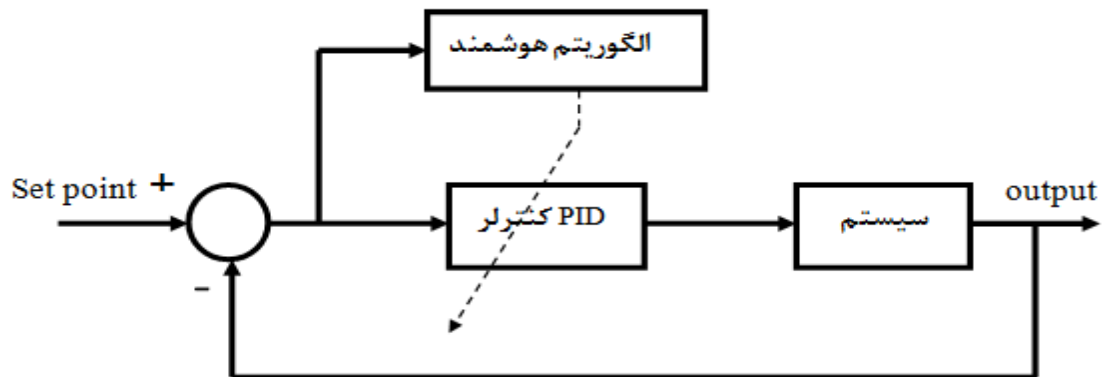
$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{T_y s + 1} \quad (۴-۱)$$

که T_y ثابت زمانی سروموتور، $u(s)$ سیگنال خروجی کنترل کننده و $y(s)$ خروجی سروموتور می‌باشد. در خیلی از مقالات برای استفاده از مدل خطی سیستم تغییرات گشتاور توربین نسبت به موقعیت دریچه را با یک قطب سمت چپ و یک صفر سمت راست تقریب می‌زنند که نامینیم فاز بودن سیستم را نشان می‌دهد [۷]، [۱۰].

در شکل (۳-۴) نحوه بهینه کردن ضرایب کنترل کننده نمایش داده شده است. تابع هزینه برای بهینه کردن ضرایب کنترل کننده، انتگرال قدر مطلق خطا می‌باشد.

$$\text{IAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| dt = \text{تابع هزینه} \quad (۴-۲)$$

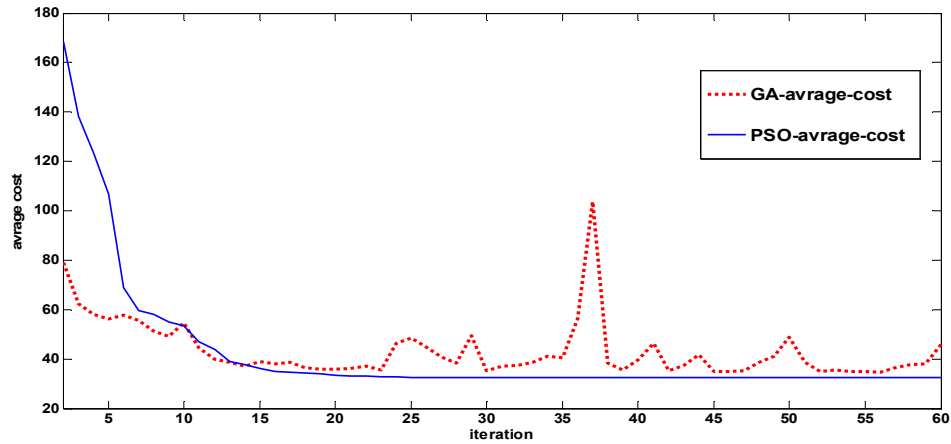
Integral Absolute Error = IAE، خطای لحظه t سیستم می‌باشد که برابر است با تفاضل نقطه تنظیم و خروجی سیستم.



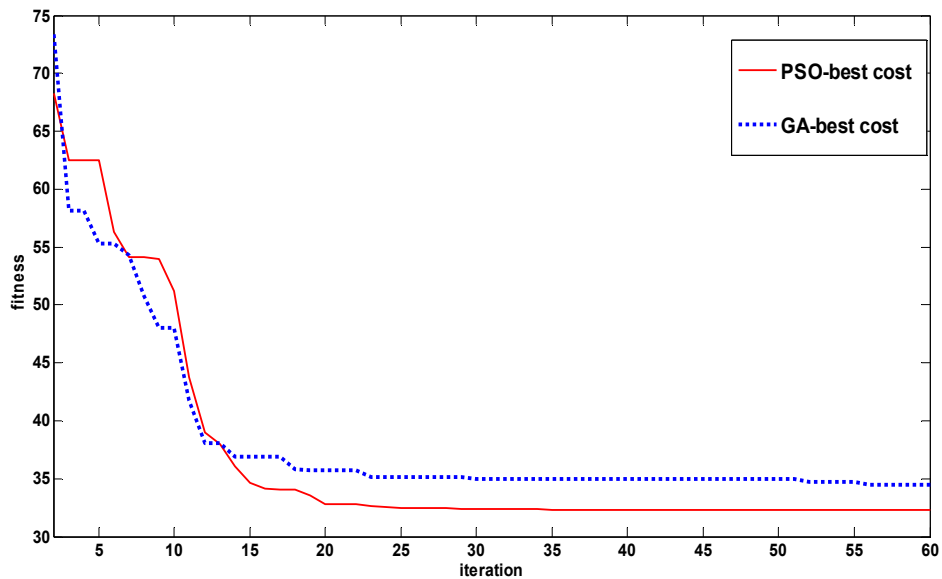
شکل (۳-۴) بلوک دیاگرام تنظیم ضرایب کنترل کننده با الگوریتم‌های هوشمند

نتایج بدست آمده از سیستم شبیه سازی شده و الگوریتم‌های هوشمند به شرح زیر می‌باشد. شکل (۴-۴) مقایسه میانگین تابع هزینه برای کروموزومها در الگوریتم ژنتیک و ذرات در الگوریتم PSO می‌باشد. همانطور که در شکل مشخص است میانگین تابع هزینه برای کروموزومها نوسان دارد که دلیل این موضوع طبیعت شبه تصادفی بودن الگوریتم ژنتیک می‌باشد. در شکل (۴-۵) مقایسه بهترین (کمترین) مقدار برای تابع هزینه در هر مرحله توسط الگوریتم‌های ژنتیک و انبوه ذرات را نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است الگوریتم انبوه ذرات به جواب بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک رسیده است. الگوریتم PSO با ۱۵ ذره شروع می‌شود و پارامترهای آن عبارتند از: $c_1 = 2 \times \text{rand}$ ، $c_2 = 4 - c_1$ و ضریب اینرسی طبق رابطه (۳-۳) به صورت خطی تغییر می‌کند. مقدار اولیه ضریب اینرسی ۰/۹ بوده و مقدار نهایی آن ۰/۲ می‌باشد.

الگوریتم GA با ۱۵ کروموزوم شروع می‌شود و نرخ جهش ۰/۰۳ و عمل تقاطع با احتمال ۰/۳ انجام می‌شود و هر عدد نیز به ۹ بیت باینری تقسیم می‌شود. بهترین مقدار هر مرحله نیز با احتمال ۱ به مرحله بعد انتقال داده می‌شود. شرط توقف هردو الگوریتم ۶۰ مرحله تکرار می‌باشد. تابع هزینه رابطه (۴-۲) می‌باشد.



شکل (۴-۴) میانگین تابع هزینه کروموزومها در ژنتیک و ذرات در PSO



شکل (۵-۴) کمترین مقدار تابع هزینه مربوط به الگوریتم‌های ژنتیک و PSO

در جدول (۴-۴) کمترین مقدار تابع هزینه و ضرایب بدست آمده برای کنترل کننده PID برای دو الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات مقایسه شده اند. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم انبوه ذرات کنترل کننده بهتری را نتیجه داده است. پاسخ پله سیستم برای کنترل کننده بدست آمده از دو الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات در شکل (۶-۴) نمایش داده شده است. در شکل (۷-۴) نمودار سیگنال کنترل برای سیستم خطی نمایش داده شده است. نرخ تغییرات بهترین مقدار ضرایب کنترل کننده در هر تکرار نیز در شکل (۸-۴) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل

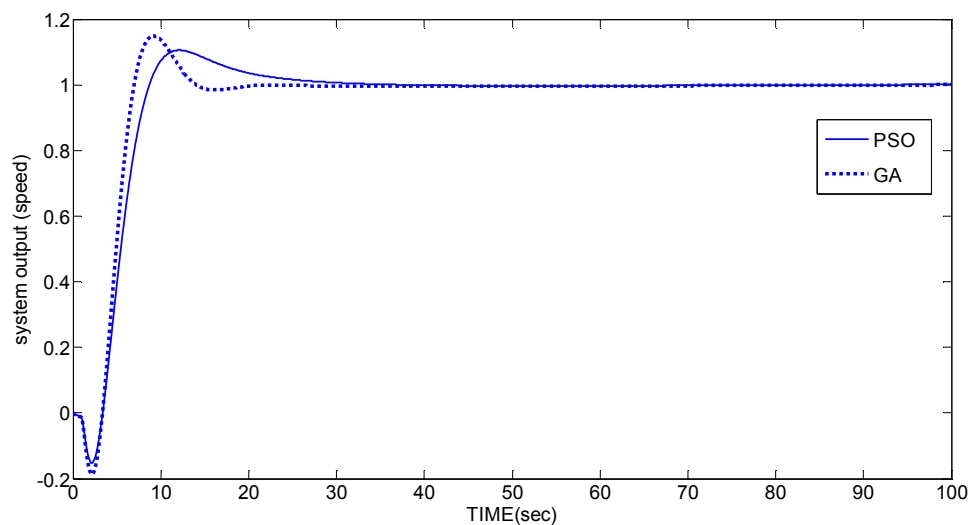
مشخص است این ضرایب بعد از چند تکرار تغییرات چندانی ندارند. که به معنای این است که تقریباً به نقطه می‌نیمم رسیده است.

ضرایب نهایی PID، برای هر دو الگوریتم تقریباً نزدیک به هم بوده که مقدار تابع هزینه نیز تقریباً این موضوع را نشان می‌دهد. ولی در مجموع الگوریتم PSO عملکرد بهتری داشته است.

جدول (۴-۴) پارامترهای کنترل کننده طراحی شده برای سیستم خطی به همراه کمترین مقدار تابع هزینه

	KP	KI	KD	کمترین مقدار تابع هزینه (IAE)
الگوریتم ژنتیک	۹/۷۴۵۶	۰/۷۰۴۵	۷/۳۳۸۶	۳۴/۳۶
الگوریتم انبوه ذرات	۹/۱۸۰۶	۰/۶۳۰۶	۸/۲۸۲۰	۳۲/۳۳۵۹

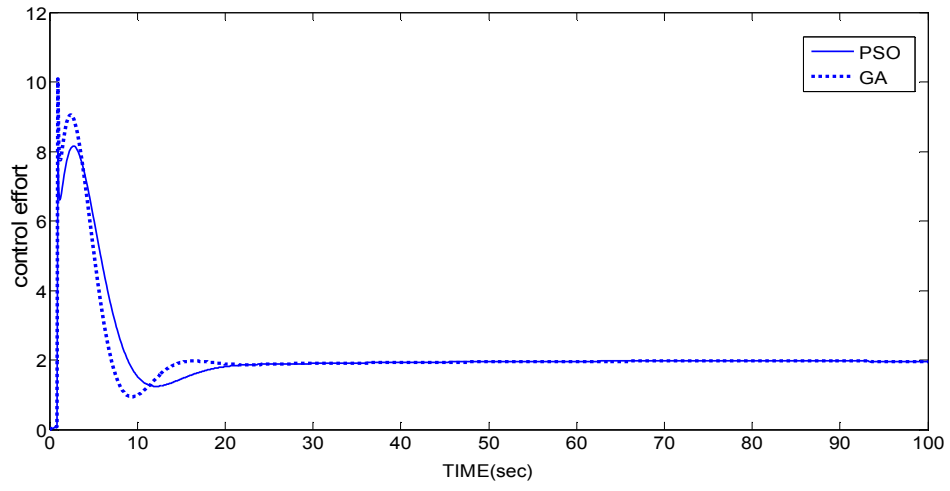
در مقایسه پاسخ پله سیستم برای دو کنترل کننده طراحی شده توسط الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات مشخص است که کنترل کننده‌ای که توسط الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات طراحی شده عملکرد بهتری دارد چون پایین‌زدگی^{۲۳} و بالا زدگی^{۲۴} کمتری دارد و سریعتر به پاسخ مطلوب رسیده است.



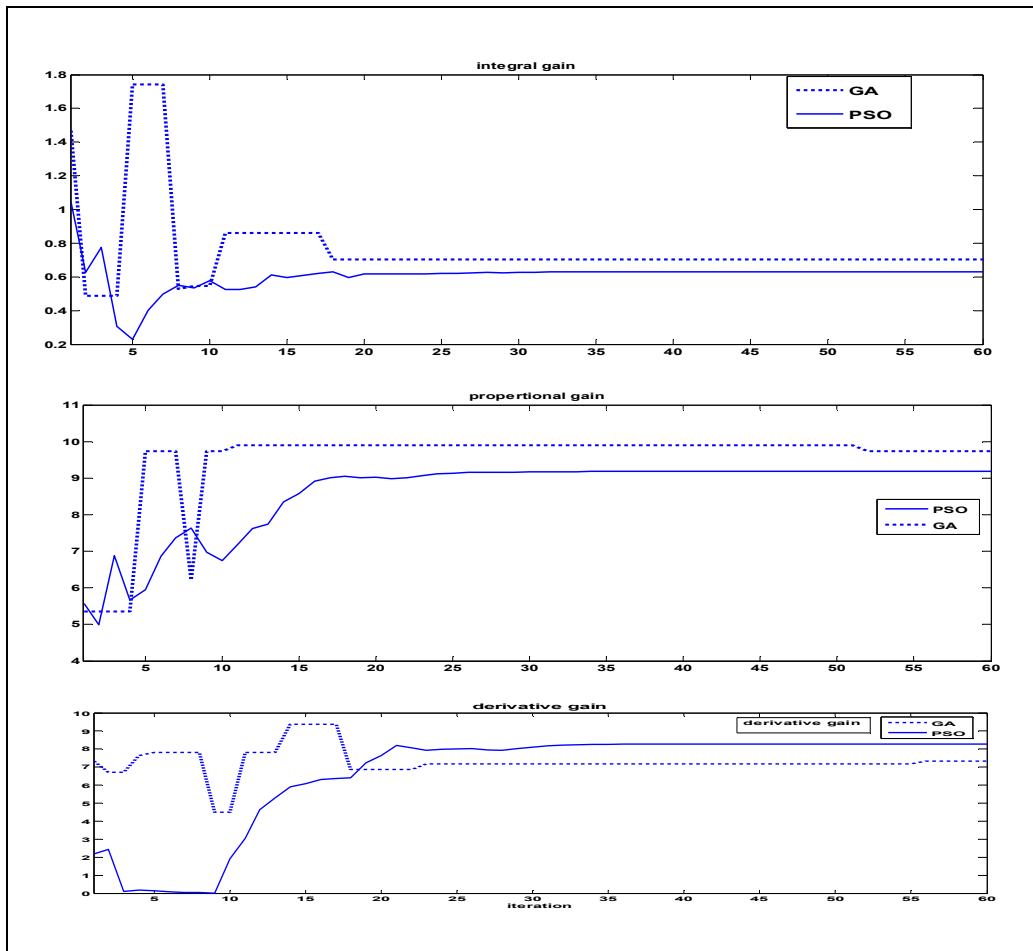
شکل (۴-۶) پاسخ پله سیستم خطی به کنترل کننده‌های طراحی شده توسط الگوریتم‌های PSO و GA

^{۲۳} Under shoot

^{۲۴} Over shoot



شکل (۴-۷) سیگنال کنترل برای سیستم خطی



شکل (۸-۴) تغییرات ضرایب کنترل کننده PID برای سیستم خطی

۴-۲ شبیه سازی سیستم غیر خطی

در فصل دوم در مورد مدلسازی نیروگاه توضیح داده شد و همه توابع تبدیل لازم برای مدلسازی سیستم گاورنر سرعت ارائه گردید. برای شبیه سازی این مدل‌ها در محیط mfile^{۲۵} نیاز است تا توابع تبدیل به فرم گسسته تبدیل نماییم. در واقع این عمل با تقریب مشتقگیری و انتگرالگیری با روابطی که آنها را به صورت معادلات تفاضلی و یا مجموع بیان کند عمل خواهد شد. در اینجا برای گسسته سازی، مشتق را با شیب دو نقطه تقریب زده و معادلات گسسته سیستم را بدست می‌آوریم. یعنی در واقع در حوزه لاپلاس s را با رابطه (۳-۴) جایگزین می‌کنیم [۶].

$$s = \frac{1-z^{-1}}{st} \quad (۳-۴)$$

که st زمان نمونه برداری و Z^{-1} یک واحد تاخیر را نمایش می‌دهد. به این ترتیب با جایگزینی مشتق با رابطه بالا روابط به دست آمده در فصل دوم را به صورت زیر گسسته می‌نماییم. تابع تبدیل پنستاک که در رابطه (۳-۲) مشخص شده به شکل زیر گسسته می‌شود.

$$q(n+1) = q(n) + \frac{st}{T_w}(1 - h(n) - hf(n)) \quad (۴-۴)$$

$$hf(n+1) = fp \times q(n)^2 \quad (۵-۴)$$

$$h(n+1) = \left(\frac{q(n)}{\text{gate}(n)}\right)^2 \quad (۶-۴)$$

که hf و h به ترتیب تلفات ارتفاع و ارتفاع سیستم می‌باشند که با روابط (۲-۵) و (۲-۱۹) نمایش داده شده‌اند، q جریان آب، gate مقدار بازشدگی دریچه و n شماره گام نمونه برداری می‌باشد. گشتاور تولیدی توربین که در رابطه (۸-۲) مشخص شده به شکل زیر در mfile نوشته می‌شود.

$$Pm(n+1) = A_t h(n)(q(n) - qnl) - KD(W(n) - 1)gate(n) \quad (۷-۴)$$

²⁵ Matlab

W سرعت چرخشی (خروجی) ژنراتور و Pm گشتاور تولیدی توربین می‌باشد. فرم ژنراتور نیز به شکل زیر گسسته می‌شود. فرم پیوسته آن رابطه (۲-۲۴) می‌باشد.

$$W(n+1) = .5 * (W(n) + \sqrt{W(n)^2 + 4 \left(\frac{st}{T_m}\right) (P_m(n) - P_{el})}) \quad (۸-۴)$$

برای فرم گسسته بخش کنترل کننده از تقریب ذوزنقه استفاده شده است.

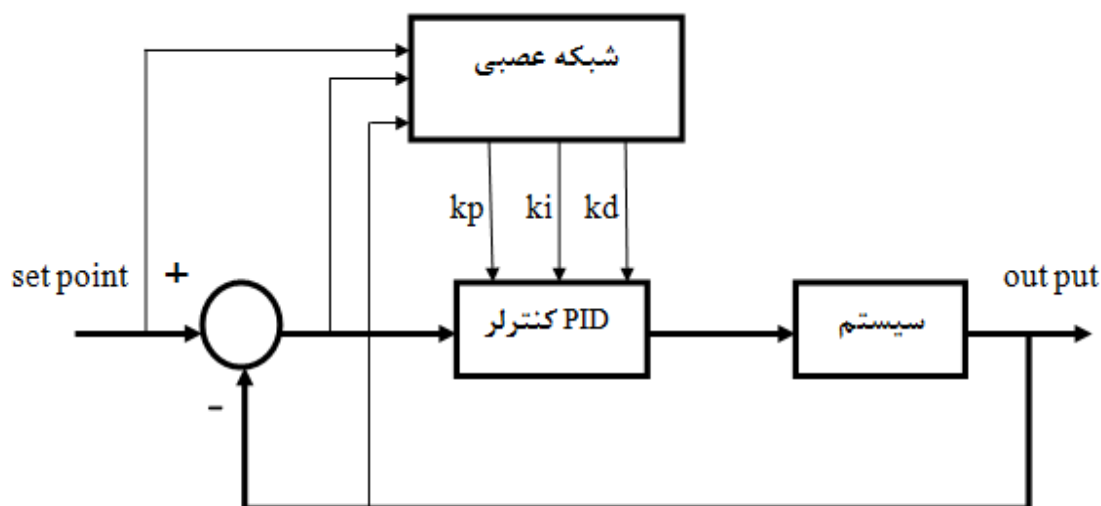
$$u(n+1) = u(n) + k_p \times (e(n) - e(n-1)) + .5 \times k_i \times st(e(n) + e(n-1)) + \frac{k_d}{st}(e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)) \quad (۹-۴)$$

که e خطای سیستم و u خروجی PID می‌باشد. و در نهایت برای مدل سروموتور از رابطه زیر استفاده می‌نماییم.

$$gate(n+1) = \left(\frac{st}{st+T_y}\right) u(n) + \left(\frac{T_y}{st+T_y}\right) gate(n) \quad (۱۰-۴)$$

۳-۴ ساختار شبکه عصبی

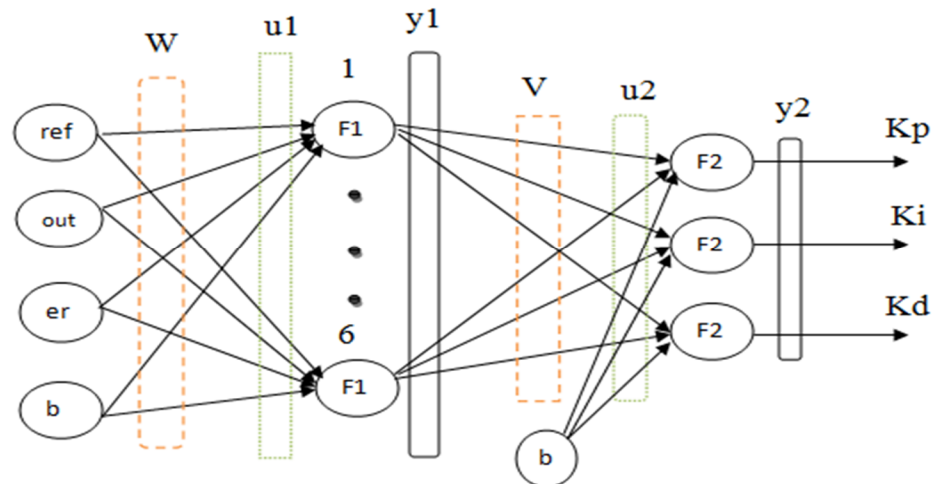
در این مرحله هدف این است که با استفاده از شبکه عصبی ضرایب کنترل کننده PID را تنظیم نماییم. در شبکه عصبی که برای تنظیم ضرایب PID به کاررفته از شبکه پرسپترون چند لایه^{۲۶} استفاده می‌کنیم بلوک دیاگرام تنظیم ضرایب PID با استفاده از شبکه عصبی به صورت شکل (۹-۴) می‌باشد.



شکل (۹-۴) بلوک دیاگرام تنظیم ضرایب PID با استفاده از شبکه عصبی

^{۲۶} Multi layer Perceptron

شبکه عصبی مورد استفاده دارای سه لایه می‌باشد که یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک لایه پنهان دارد. ساختار شبکه عصبی که به منظور تنظیم ضرایب PID به کار برده می‌شود مانند شکل (۴-۱۰) است.



شکل (۴-۱۰) ساختار شبکه عصبی تنظیم کننده ضرایب PID

لایه ورودی از ۴ نورون^{۲۷} تشکیل یافته که متغیرهای خطا، خروجی، ورودی فرمان و بایاس می‌باشد. لایه پنهان نیز از ۶ نورون تشکیل شده است. تعداد نورون‌های لایه خروجی که همواره بر اساس نیاز مسأله مشخص می‌شود دارای ۳ نورون است. که خروجی این نورون‌ها ضرایب کنترل کننده PID می‌باشند. روابط مسیر پیشرو^{۲۸} شبکه عصبی به شکل زیر می‌باشد. اگر ماتریس وزنهای لایه اول را با W و بردار ورودی را با X نمایش دهیم آنگاه:

$$u1 = WX^T \quad (۴-۱۱)$$

$$y1 = f1(u1) \quad (۴-۱۲)$$

بردار ورودی یک بردار ۱×۴ می‌باشد و ماتریس وزنها به دلیل اینکه لایه پنهان ۶ نورون دارد و ورودی ۴ درایه دارد یک ماتریس ۶×۴ می‌باشد. بنابراین $u1$ یک ماتریس ۶×۱ می‌باشد که جمع وزن دار ورودی‌ها می‌باشد. برای ادامه

^{۲۷} Neuron

^{۲۸} Forward pass

مسیر پیشرو ماتریس وزنهای لایه دوم یک ماتریس 3×6 می باشد V را در خروجی لایه اول $y1$ که یک ماتریس 6×1 می باشد ضرب می کنیم.

$$u2 = V * y1 \quad (13-4)$$

$$y2 = f2(u2 + b12) \quad (15-4)$$

از آنجائیکه ماتریس $u2$ (جمع وزن دار لایه دوم) یک ماتریس 3×1 می باشد پس ماتریس $b12$ نیز باید یک ماتریس 3×1 باشد تا جمع آنها امکان پذیر باشد. خروجی شبکه عصبی $y2$ یک ماتریس 3×1 می باشد که هر کدام از سطرهای خروجی یکی از ضرایب کنترل کننده PID می باشد.

$$\begin{bmatrix} y2(1,1) \\ y2(2,1) \\ y2(3,1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kp \\ ki \\ kd \end{bmatrix} \quad (16-4)$$

این ضرایب به کنترل کننده اعمال می شوند و پس از محاسبه خطا، از خطای تولید شده برای آموزش شبکه عصبی استفاده می کنیم تا ضرایب بهینه به دست آیند. برای آموزش شبکه عصبی ابتدا تابع هزینه را طبق رابطه (4-18) تعریف می کنیم.

$$er(n) = ref(n) - out(n) \quad (17-4)$$

$$J(n) = .5 * er(n)^2 \quad (18-4)$$

که در روابط بالا er خطا، ref ورودی فرمان، J تابع هزینه و out خروجی سیستم می باشد. چون در آموزش شبکه عصبی از الگوریتم پس انتشار خطا استفاده می کنیم و در الگوریتم پس انتشار خطا از مشتق گیری استفاده می شود بنابراین لازم است تابع هزینه حتما مشتق پذیر باشد.

توابع فعال سازی استفاده شده در لایه اول و دوم مانند هم نیستند. در لایه دوم چون به خروجی بیشتر از یک احتیاج است از تابعی استفاده شده تا بتوان به خروجی بیشتر از یک نیز دست یافت.

$$f1(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (19-4)$$

$$f2(x) = \frac{2|k|}{1 + \exp(-2|k|x)} \quad (20-4)$$

در تابع f_2 که برای لایه دوم به کار برده شده با تغییر k دامنه خروجی آن تغییر می‌کند. و چون ضرایب کنترل کننده بین صفر تا 5 می‌باشند k را 5 می‌گیریم.

در ادامه می‌خواهیم که شبکه عصبی را آموزش دهیم تا ضرایب بهینه برای PID به دست آیند. برای به روز کردن پارامترهای قابل تنظیم شبکه عصبی از رابطه (۴-۲۱) استفاده می‌کنیم.

$$\theta(n+1) = \theta(n) - \eta \frac{\partial J}{\partial \theta} \quad (۴-۲۱)$$

که θ وزنهای شبکه عصبی می‌باشد. یعنی اینکه θ برای لایه اول ماتریس w و برای لایه دوم ماتریس V می‌باشد و η ضریب یادگیری شبکه عصبی است. که η برابر 0.5 در نظر گرفته شده است.

ابتدا وزنهای لایه دوم را به روز می‌نمائیم برای این منظور طبق رابطه (۴-۲۲) عمل می‌کنیم.

$$\frac{\partial J}{\partial V} = \frac{\partial J}{\partial(er)} \frac{\partial(er)}{\partial(out)} \frac{\partial(out)}{\partial(Uc)} \frac{\partial(Uc)}{\partial(y2)} \frac{\partial(y2)}{\partial V} \quad (۴-۲۲)$$

همه متغیرهای فوق روی شکل (۴-۱۰) نمایش داده شده‌اند. تمامی مشتق‌های رابطه (۴-۲۲) به سادگی قابل حصول‌اند به استثنای $\frac{\partial(out)}{\partial(Uc)}$ که مشتق خروجی نسبت به سیگنال کنترل می‌باشد. برای محاسبه این مشتق لازم است سیستم را شناسایی نمائیم. در بخش ۴-۳ جزئیات کامل شناسایی آورده شده است. در ادامه ما فرض می‌کنیم که این رابطه موجود است یعنی اینکه سیستم شناسایی شده و مشتق خروجی نسبت به سیگنال کنترل موجود است. و به جای این رابطه عبارت Jacob را استفاده می‌کنیم که نشان دهنده مشتق سیستم می‌باشد. حال یکی یکی مشتقات رابطه (۴-۲۲) را حساب می‌کنیم:

$$\frac{\partial J}{\partial(er)} = er \quad (۴-۲۳)$$

$$\frac{\partial(er)}{\partial(out)} = -1 \quad (۴-۲۴)$$

$$\frac{\partial(out)}{\partial(Uc)} = \text{Jacob} \quad (۴-۲۵)$$

$$\frac{\partial(Uc)}{\partial(y2)} = \left[\begin{array}{c} er(n) - er(n - 1) \\ .5 * st * (er(n) + er(n - 1)) \\ \frac{1}{st}(er(n) - 2 * er(n - 1) + er(n - 2)) \end{array} \right] \quad (26-4)$$

در واقع رابطه (26-4) مشتق سیگنال کنترل نسبت به ضرایب PID می‌باشد که این ضرایب همان خروجی $y2$ شبکه عصبی می‌باشند.

$$\frac{\partial(y2)}{\partial v} = \frac{\partial f2(u2)}{\partial v} = y1 * f2'(u2) \quad (27-4)$$

بعد از به‌روز رسانی وزنه‌های لایه دوم ماتریس بایاس لایه دوم را نیز به‌روز رسانی می‌نماییم. برای این منظور از رابطه (28-4) استفاده می‌کنیم.

$$\frac{\partial J}{\partial bl2} = \frac{\partial J}{\partial(er)} \frac{\partial(er)}{\partial(out)} \frac{\partial(out)}{\partial(Uc)} \frac{\partial(Uc)}{\partial(y2)} \frac{\partial(y2)}{\partial bl2} \quad (28-4)$$

همه مشتقات فوق به جزء $\frac{\partial(y2)}{\partial bl2}$ در روابط (23-4) تا رابطه (26-4) محاسبه شده‌اند و این مشتق را نیز از رابطه (29-4) محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{\partial(y2)}{\partial(bl2)} = \frac{\partial f2(u2)}{\partial(bl2)} = f2'(u2) \quad (29-4)$$

بعد از به‌روز رسانی وزنه‌های لایه دوم، وزنه‌های لایه اول را نیز به‌روز می‌نماییم. برای این منظور از رابطه (30-4) استفاده می‌کنیم.

$$\frac{\partial J}{\partial W} = \frac{\partial J}{\partial(er)} \frac{\partial(er)}{\partial(out)} \frac{\partial(out)}{\partial(Uc)} \frac{\partial(Uc)}{\partial(y2)} \frac{\partial(y2)}{\partial(y1)} \frac{\partial(y1)}{\partial W} \quad (30-4)$$

مشتقات $\frac{\partial(y2)}{\partial(y1)}$ و $\frac{\partial(y1)}{\partial W}$ را طبق روابط (31-4) و (32-4) محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{\partial(y2)}{\partial(y1)} = \frac{\partial f2(u2)}{\partial(y1)} = V * f2'(u2) \quad (31-4)$$

$$\frac{\partial(y1)}{\partial W} = X^T f1'(u1) \quad (32-4)$$

در نهایت ماتریس وزنه‌های لایه اول و دوم طبق روابط (33-4)، (34-4) و (35-4) به‌روز می‌شوند.

$$W(n + 1) = W(n) - \eta \frac{\partial J}{\partial W} \quad (33-4)$$

$$V(n + 1) = V(n) - \eta \frac{\partial J}{\partial V} \quad (34-4)$$

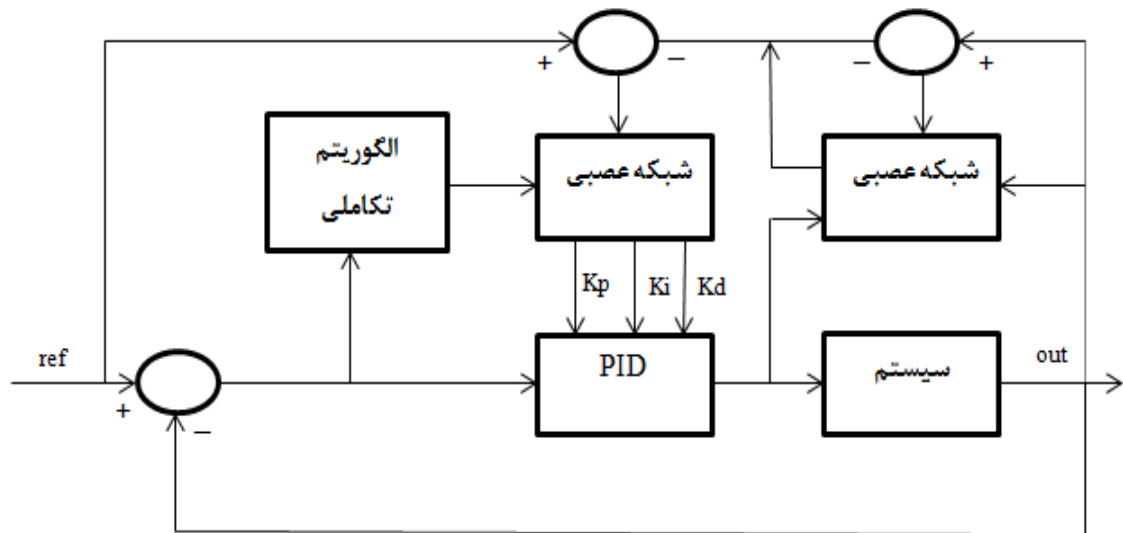
$$bl2(n + 1) = bl2(n) - \eta \frac{\partial J}{\partial(bl2)} \quad (35-4)$$

۴-۴ شناسایی سیستم

برای محاسبه مشتق خروجی نسبت به سیگنال کنترل نیاز است که سیستم شناسایی شود. همانطور که می‌دانیم دو روش شناسایی وجود دارد که عبارتند از: (۱) شناسایی مدل فضای حالت و (۲) شناسایی مدل ورودی-خروجی. چون در این سیستم مقادیر مطلوب متغیرهای حالت را نداریم بنابراین از روش مدل ورودی-خروجی استفاده می‌کنیم. یعنی باید یک نگاشت غیرخطی بین سیگنال کنترل و خروجی پیدا کنیم که تا حد ممکن برای ورودی-های مختلف شبیه سیستم عمل نماید. بلوک دیاگرام شناسایی سیستم و استفاده از آن برای آموزش وزنه‌های شبکه عصبی که برای تنظیم ضرایب PID استفاده می‌شود به فرم شکل (۴-۱۱) می‌باشد.

اگر سیستم به‌طور دقیق یا حداقل خطا شناسایی شود آنگاه رابطه (۴-۳۶) برقرار است و در روابط اخیر در صورت نیاز به مشتق خروجی نسبت به سیگنال کنترل، می‌توان از مشتق خروجی شبکه عصبی شناسایی کننده به سیگنال کنترل استفاده نمود.

$$\frac{\partial y}{\partial U_c} = \frac{\partial(y_i)}{\partial U_c} \quad (۴-۳۶)$$



شکل (۴-۱۱) بلوک دیاگرام روش شناسایی و کنترل سیستم

برای شناسایی سیستم نیاز به توالی از ورودی‌ها و خروجی‌ها می‌باشد که به شبکه عصبی اعمال شوند تا شبکه عصبی بر اساس این ورودی‌ها و خروجی یک نگاشت غیرخطی که رفتار سیستم را داشته باشد پیدا کند. برای شناسایی این سیستم ۴ نمونه متوالی از ورودی و ۴ نمونه متوالی از خروجی را به عنوان ورودی به شبکه عصبی اعمال می‌نماییم.

شبکه عصبی مورد استفاده از نوع پرسپترون چند لایه می‌باشد که دارای سه لایه می‌باشد لایه ورودی که از ۹ نورون تشکیل شده ۴ نمونه از سیگنال کنترل ۴ نمونه خروجی و یک بایاس به مقدار ۱. لایه پنهان ۶ نورون و لایه خروجی بر اساس نیاز مسئله یک نورون دارد. بردار ورودی شبکه عصبی به صورت رابطه (۴-۳۷) می‌باشد.

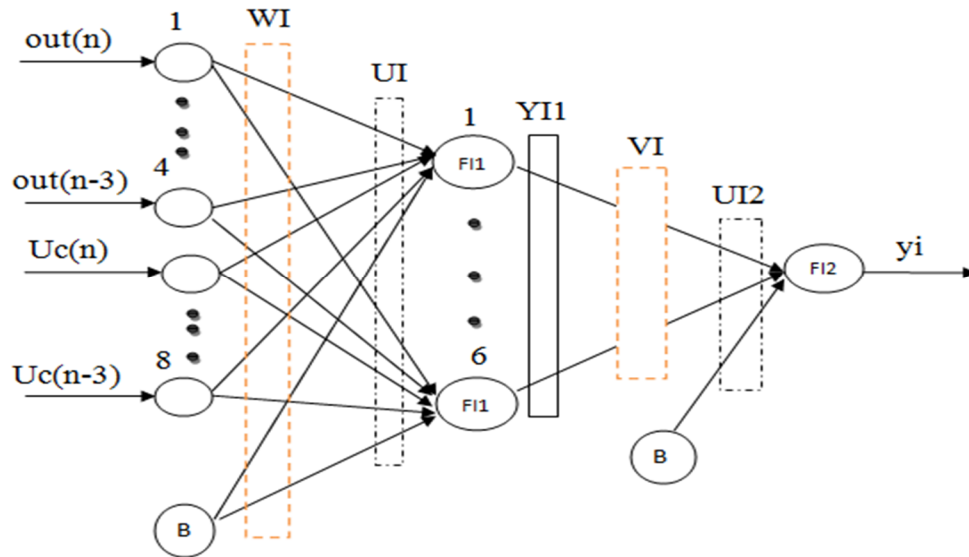
$$XI = [y(n) \ y(n-1) \ y(n-2) \ y(n-3) \ Uc(n) \ Uc(n-1) \ Uc(n-2) \ Uc(n-3) \ bias] \quad (۴-۳۷)$$

تابع هزینه مورد استفاده برای آموزش شبکه عصبی رابطه (۴-۳۹) می‌باشد. و رابطه (۴-۳۸) خطای سیستم شناسایی کننده می‌باشد که تفاضل خروجی سیستم و خروجی سیستم شناسایی کننده می‌باشد.

$$ei(n) = y(n) - yi(n) \quad (۴-۳۸)$$

$$II(n) = .5 * ei(n)^2 \quad (۴-۳۹)$$

در روابط بالا ei خطای سیستم شناسایی کننده، yi خروجی سیستم شناسایی کننده، y خروجی سیستم، II تابع هزینه برای آموزش شبکه عصبی می‌باشد. مسیر پیشرو شبکه عصبی به صورت زیر می‌باشد. ساختار شبکه عصبی به صورت شکل (۴-۱۲) می‌باشد.



شکل (۴-۱۲) ساختار شبکه عصبی شناسایی کننده سیستم

$$UI = WI \cdot XI^T \quad (۴۰-۴)$$

$$YI1 = FI1(UI1) \quad (۴۱-۴)$$

$$UI2 = YI1 * VI + BI2 \quad (۴۲-۴)$$

$$yi = FI2(UI2) \quad (۴۳-۴)$$

خروجی شبکه عصبی y_i را در ۳ ضرب می‌کنیم تا اگر خروجی بیشتر از یک شد بتواند آن را دنبال کند. برای به روز رسانی وزنها مشابه شبکه عصبی قبل عمل می‌کنیم. به طور نمونه برای به روز رسانی وزنها لایه دوم طبق رابطه (۴۴-۴) عمل می‌کنیم.

$$VI(n+1) = VI(n) - \eta \frac{\partial(JI)}{\partial(VI)} \quad (۴۴-۴)$$

مشتق تابع هزینه نسبت به وزنها لایه دوم را از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{\partial(JI)}{\partial(VI)} = \frac{\partial(JI)}{\partial(ei)} \frac{\partial(ei)}{\partial(yi)} \frac{\partial(yi)}{\partial(VI)} \quad (۴۵-۴)$$

در ادامه هر کدام از مشتقات بالا را به دست آورده و در رابطه (۴۵-۴) جایگزین کرده و در نهایت مقدار به دست آمده را در رابطه (۴۴-۴) جایگزین می‌کنیم تا وزنها مرحله بعدی لایه دوم بدست آیند.

$$\frac{\partial(JI)}{\partial(ei)}(n) = ei(n) \quad (۴۶-۴)$$

$$\frac{\partial(ei)}{\partial(yi)}(n) = -1 \quad (47-4)$$

$$\frac{\partial(yi)}{\partial(VI)} = YI1 * F\dot{I}2(UI2) \quad (48-4)$$

حال روابط را جایگزین کرده و ماتریس وزنهای لایه دوم در مرحله بعد به دست می‌آیند. برای به روز رسانی بقیه وزنها نیز شبیه به روز رسانی وزنهای لایه دوم عمل می‌نماییم. قبلاً گفته شد که هدف از شناسایی به دست آوردن مشتق خروجی نسبت به سیگنال کنترل است. حال می‌خواهیم مشتق خروجی به سیگنال کنترل را بر اساس رابطه زیر محاسبه کنیم.

$$\frac{\partial(yi(n))}{\partial(Uc(n))} = \frac{\partial(yi)}{\partial(YI1)} \frac{\partial(YI1)}{\partial(Uc(n))} \quad (49-4)$$

$$\frac{\partial(yi)}{\partial(YI1)} = VI * F\dot{I}2(UI2) \quad (50-4)$$

$$\frac{\partial(YI1)}{\partial(Uc(n))} = F\dot{I}1(UI1) * WI(:,5) \quad (51-4)$$

چون برای محاسبه مشتق خروجی نسبت به سیگنال کنترل فقط سطر ۵ از ترانهاده ماتریس ورودی احتیاج است پس به بقیه ستونهای ماتریس وزنهای لایه اول احتیاج نیست فقط ستون ۵ آن را در نظر می‌گیریم. رابطه (۴-۵۱) مشتق سیستم می‌باشد و در محاسبات به روز رسانی شبکه عصبی تنظیم کننده ضرایب کنترل کننده از این رابطه استفاده می‌شود.

۴-۵ شبیه سازی سد دز

نیروگاه برق آبی دز با ظرفیت تولید ۵۲۰ مگا وات از اولین نیروگاه‌های برق آبی بزرگ کشور می‌باشد. نیروگاه دز در سال ۱۳۴۱ بر روی رودخانه دز احداث گردید و تا سالهای اخیر وظیفه کنترل فرکانس کل شبکه برق کشور به عهده این نیروگاه بوده است که به دلیل عدم توانمندی کنترل شبکه‌ای با ظرفیت در حدود ۴۸ هزار مگاوات، این وظیفه مهم در حال حاضر به نیروگاه برق آبی کارون ۳ و سایر نیروگاهها محول گردیده است. با توجه به مشخصه‌ها و ویژگی‌های سد و نیروگاه برق آبی دز، پارامترها و ثابت‌های زمانی مربوط به مدل نیروگاه را استخراج

می‌نماییم و با استفاده از مدل اجزاء و پارامترهای استخراج شده، مدل بخش هیدرولیک نیروگاه دز را ارائه نموده و شبیه سازی را در محیط mfile مطلب انجام داده و نتایج آنرا ارائه می‌نماییم.

جدول (۴-۵) ابعاد آبراهه‌ها را برای هر یک از واحدها نشان می‌دهد و جدول (۴-۶) زمان شروع آب را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. زمان شروع برای تونل مشترک (قسمتی از مسیر آبراهه که در آن برای چند واحد در حرکت است) دقیقاً تابعی خطی از تعداد واحدهای در حال کار می‌باشد.

جدول (۴-۵) مشخصات ابعادی آبراهه‌ها برای کلیه واحدهای سد دز [۱۷]

جریان نامی $(\frac{m^3}{s})$	قطر (m)	طول (m)	قسمت
۴×۵۹/۲	۱۰	۲۰۲/۳۰۹	تونل قدرت نیروگاه اول
۴×۵۹/۲	۱۰	۲۵۳/۲۸	تونل قدرت نیروگاه دوم
۵۹/۲	۴	۱۴۰	پنستاک نیروگاه اول
۵۹/۲	۴	۱۴۰	پنستاک نیروگاه دوم

جدول (۴-۶) مقادیر زمان شروع آب برای حالت‌های مختلف [۱۷]

تعداد واحد	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
زمان شروع آب	۰/۴۷۲	۰/۵۶۲	۰/۶۵۲	۰/۷۴۲	۰/۴۹۲	۱/۶۰۲	۰/۷۱۲	۰/۸۲۲

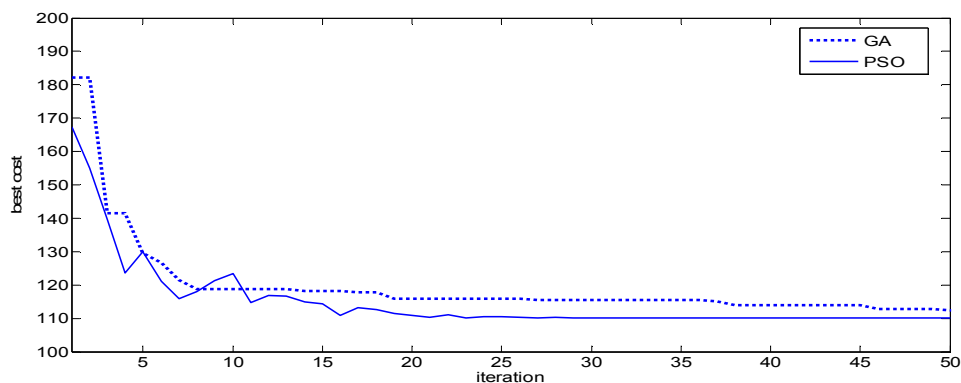
شبیه سازی را برای حالتی که یک واحد از نیروگاه در حال کار است یعنی زمان شروع آب ۰/۴۷۲ ثانیه می‌باشد را انجام می‌دهیم. پارامترهای سیستم برای شبیه سازی عبارتند از بهره توربین ۱/۲۵ مقدار جریان آب بی باری ۰/۱۲، مقدار مصرف داخلی نیروگاه یا Pel، ۰/۰۳، ضریب میرایی توربین KD، ۰/۵ و زمان نمونه برداری ۰/۰۱ ثانیه می‌باشد.

نتایج شبیه سازی شده برای مدل غیرخطی توسط الگوریتم‌های ژنتیک و PSO و شبکه عصبی به شرح جدول (۴-۷) می‌باشد. در این جدول ضرایب به دست آمده، زمان اجرا و بهترین مقدار تابع هزینه مشخص شده است.

جدول (۴-۷) مقایسه پارامترهای مختلف روش‌های بهینه‌سازی برای کنترل‌کننده سد دز

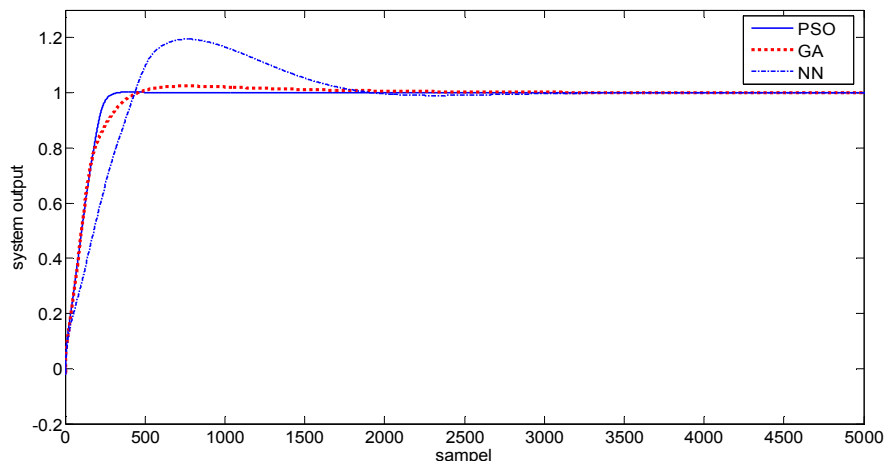
روش بهینه‌سازی	Kp	Ki	Kd	IAE	زمان اجرا
PSO	۴/۳	۰/۱۲۸	۴/۵۵۶	۱۱۰/۱۰۷	۲۳ دقیقه
GA	۴/۵۵	۰/۱۳۲	۴/۸۵	۱۱۲/۵	۲۵ دقیقه
NN	۲/۸۴۳	۰/۳۴۵	۱/۸۴۶	۳۰۸/۱۰۹	۴۰ ثانیه

در شکل (۴-۱۳) نرخ می‌نیمم‌سازی تابع هزینه به وسیله الگوریتم‌های ژنتیک و PSO آورده شده که الگوریتم PSO عملکرد بهتری نسبت به ژنتیک داشته چون مقدار تابع هزینه مناسب‌تر و همگرایی سریعتری نسبت به الگوریتم ژنتیک داشته است. از نظر زمان اجرا شبکه عصبی خیلی سریعتر از هر دو الگوریتم عمل کرده است چون آموزش شبکه عصبی بر پایه مشتق می‌باشد. بنابراین در مراحل بعدی شبیه‌سازی از الگوریتم PSO برای آموزش شبکه عصبی استفاده می‌نماییم تا علاوه بر دقت لازم، سرعت بالا را نیز داشته باشیم.



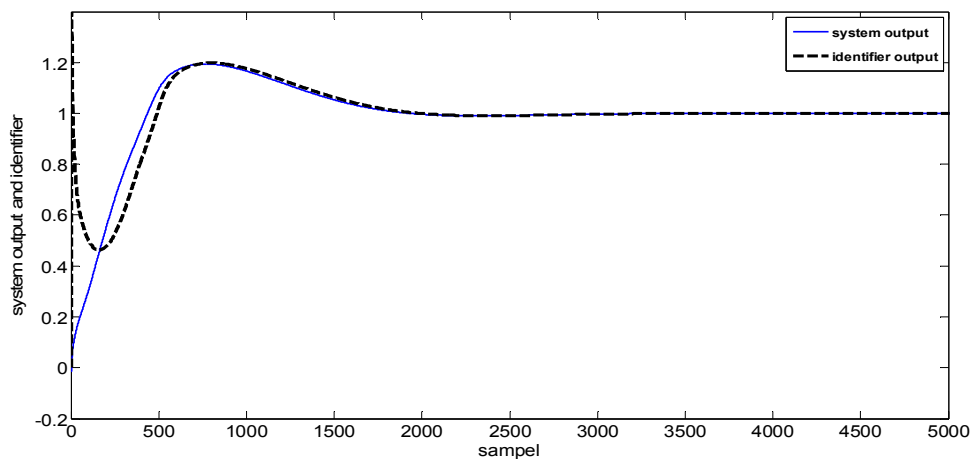
شکل (۴-۱۳) تغییرات تابع هزینه‌ی الگوریتم‌های ژنتیک و PSO برای سد دز

در شکل (۴-۱۴) خروجی سیستم برای یک ورودی پله رسم شده که نشان می‌دهد الگوریتم PSO عملکرد بهتری داشته چون سریعتر به مقدار نهایی رسیده و بالازدگی کمتری نیز دارد.



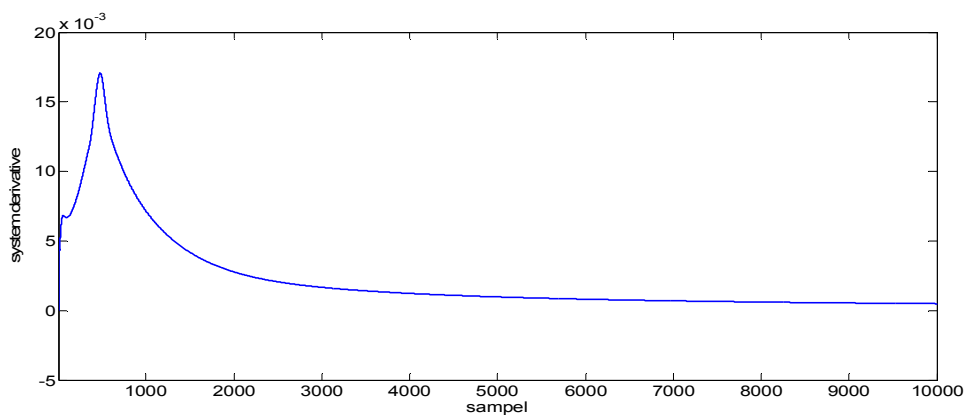
شکل (۴-۱۴) خروجی سیستم سد دز برای ورودی پله مربوط به کنترل کننده‌های طراحی شده

برای اینکه از شبکه عصبی برای تنظیم ضرایب PID استفاده کنیم، همانطور که در بخش ۳-۴ گفته شد نیاز به شناسایی سیستم می‌باشد که همزمان با کنترل سیستم صورت می‌گیرد. در شکل (۴-۱۵) نشان داده می‌شود که چگونه خروجی شبکه عصبی شناساگر بر خروجی سیستم منطبق می‌شود. یکی از دلایلی که شبکه عصبی در لحظات اولیه نمی‌تواند به طور صحیح کنترل کننده را تنظیم کند، این است که سیستم هنوز شناسایی نشده و مشتق سیستم که برای تنظیم ضرایب کنترل کننده استفاده می‌شود صحیح نیست.



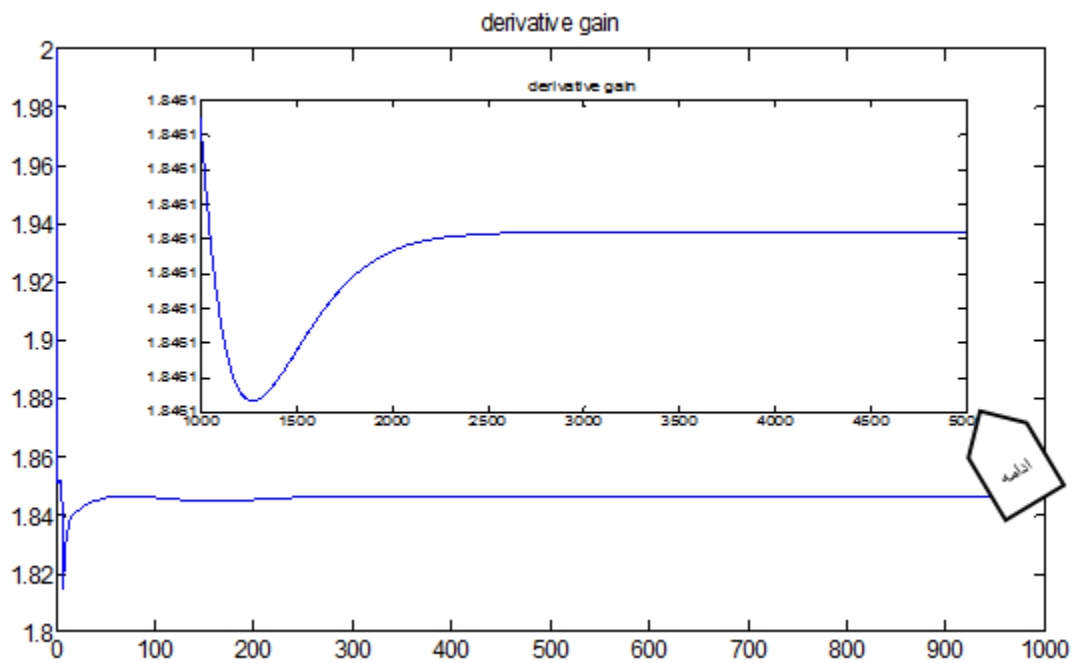
شکل (۴-۱۵) خروجی شبکه عصبی شناساگر و خروجی سیستم سد دز

مشتق خروجی سیستم نسبت به سیگنال کنترل که برای به روزرسانی وزنه‌های شبکه عصبی کنترل کننده استفاده می‌شود در نمودار شکل (۴-۱۶) نمایش داده شده است. این نمودار مشتق خروجی شبکه عصبی شناساگر نسبت به سیگنال کنترل (خروجی PID) می‌باشد.

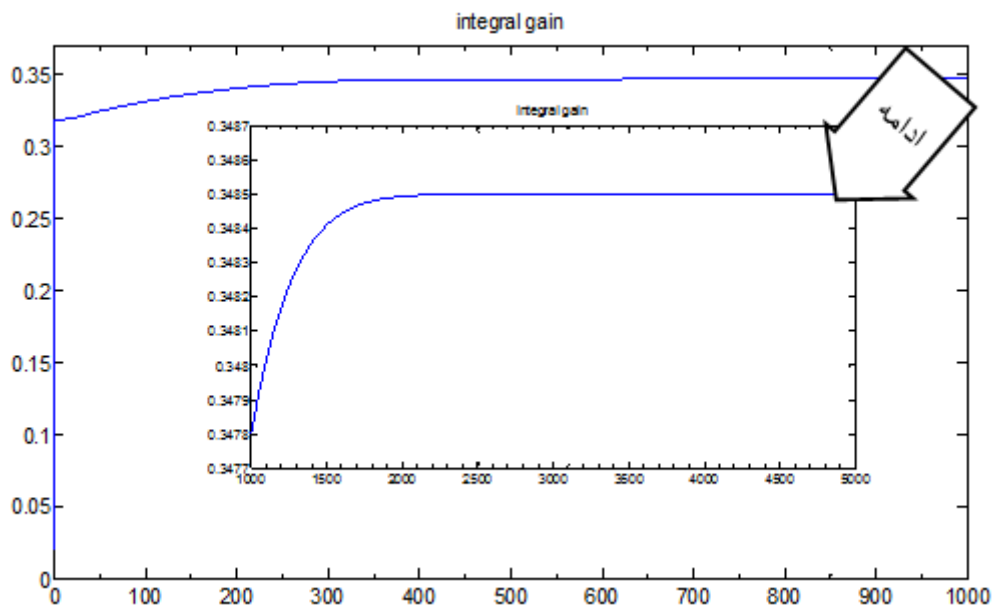


شکل (۴-۱۶) مشتق خروجی شناساگر نسبت به سیگنال کنترل

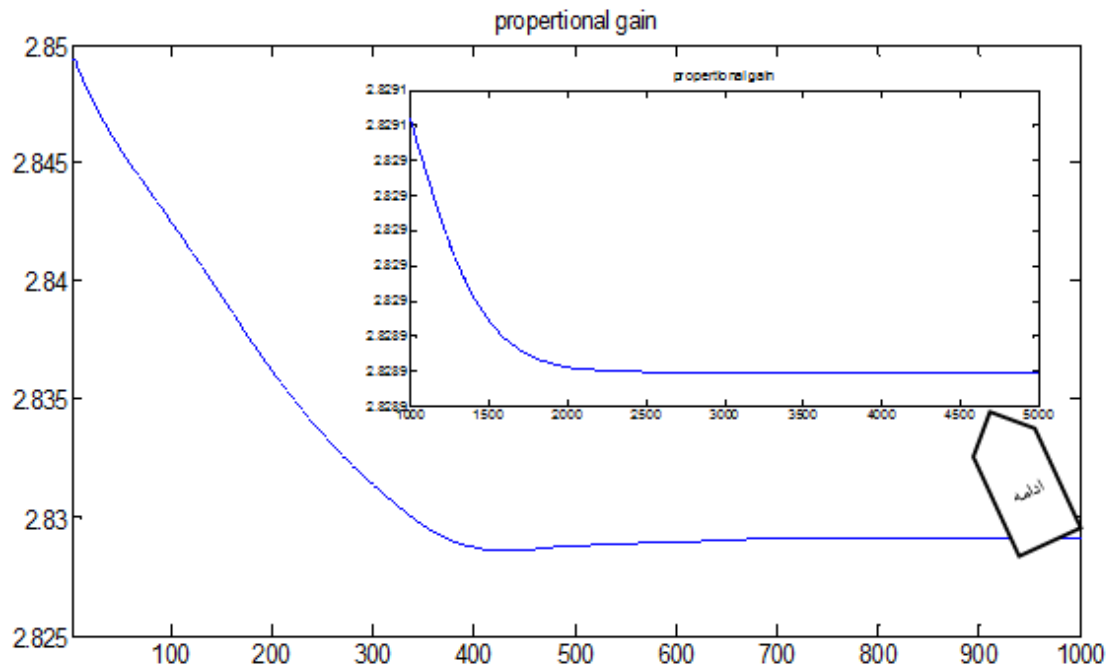
در شکل (۴-۱۷)، (۴-۱۸)، (۴-۱۹) به ترتیب نرخ تغییرات ضریب مشتق‌گیر، ضریب انتگرال‌گیر و بهره تناسبی نمایش داده شده است.



شکل (۴-۱۷) نرخ تغییرات ضریب مشتق گیر توسط شبکه عصبی

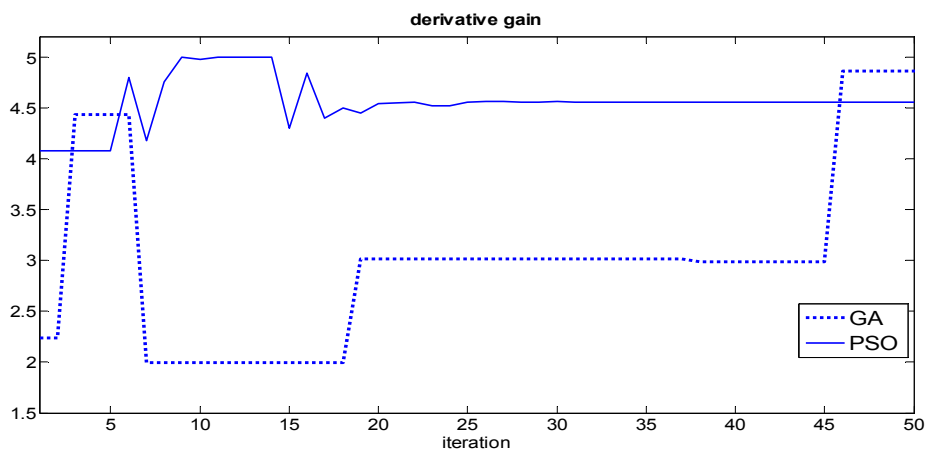


شکل (۴-۱۸) نرخ تغییرات ضریب انتگرال گیر توسط شبکه عصبی

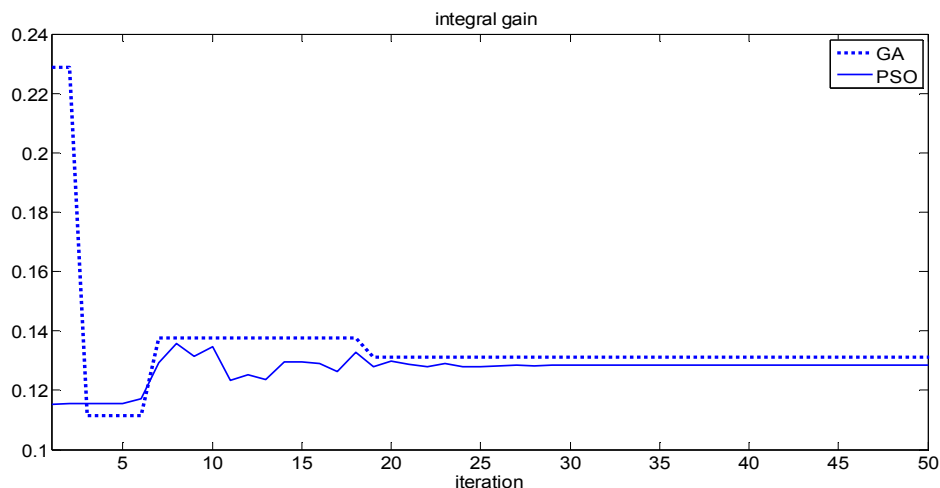


شکل (۴-۱۹) نرخ تغییرات بهره تناسبی توسط شبکه عصبی

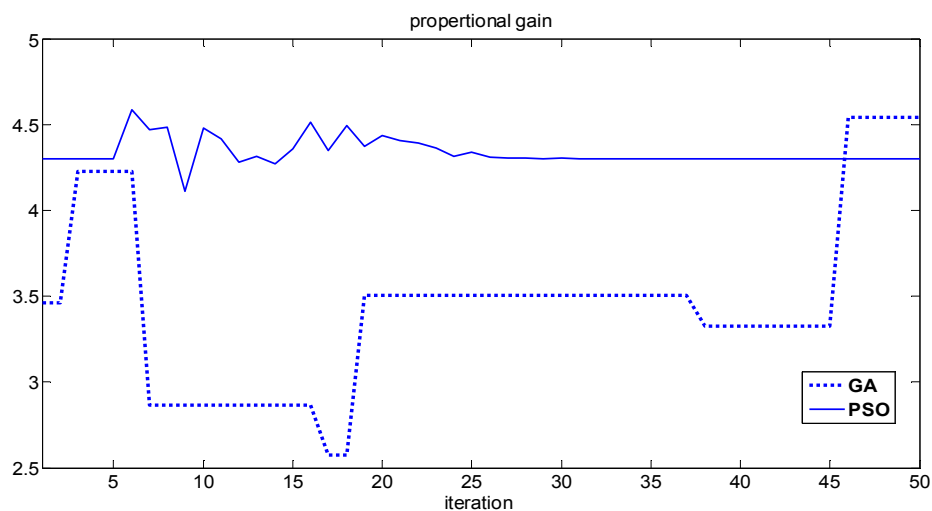
تغییرات ضرایب مشتقگیر، انتگرال گیر و بهره تناسبی (حاصل از الگوریتم ژنتیک و PSO) به ترتیب در شکل‌های (۴-۲۰)، (۴-۲۱) و (۴-۲۲) نمایش داده شده‌اند. الگوریتم انبوه ذرات ۱۴ ذره و الگوریتم ژنتیک نیز ۱۴ کروموزوم دارد که هر ذره یا کروموزوم سه متغیر دارد که ضرایب کنترل کننده می‌باشند. در هر مرحله بهترین این ذرات و کروموزومها ذخیره شده که در این نمودار مشخص می‌باشند. تغییرات ناگهانی موجود در نمودارهای مربوط به الگوریتم ژنتیک نشان دهنده طبیعت شبه تصادفی (تصادفی هدایت شده) بودن آن است.



شکل (۴-۲۰) تغییرات ضرایب مشتق‌گیر حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک و PSO برای سیستم سد دز



شکل (۴-۲۱) تغییرات ضرایب انتگرال گیر حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک و PSO برای سیستم سد دز



شکل (۴-۲۲) تغییرات بهره تناسبی حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک و PSO برای سیستم سد دز

۴-۶ بهینه سازی وزنه‌های اولیه شبکه عصبی با استفاده از PSO

برای بهینه سازی وزنه‌های شبکه عصبی ابتدا لازم است که تعداد وزنه‌های شبکه عصبی را محاسبه کنیم. از آنجائیکه شبکه عصبی دارای ۳ لایه است و لایه اول ۴ نورون (با احتساب بایاس)، لایه پنهان ۶ نورون و در خروجی ۳ نورون و بایاس لایه دوم نیز وجود دارد پس ۴۵ وزن در این شبکه وجود دارد. که به ترتیب در لایه اول و دوم ۲۴ و ۲۱ (۳ وزن مربوط به بایاس) وزن وجود دارد. بنابراین برای شروع بهینه سازی هر ذره از ۴۵ قسمت تشکیل می‌شود. یعنی هر ذره یک بردار با یک سطر و ۴۵ ستون می‌باشد. که ۲۴ درایه اول آن به یک ماتریس 4×6 ، ۱۸ درایه بعدی

به یک ماتریس 3×6 ، و 3 درایه آخر که مربوط به بایاس لایه دوم می‌باشند به یک ماتریس 3×1 ، با استفاده از دستور reshape طبق روابط (۴-۵۲)، (۴-۵۳) و (۴-۵۴) تبدیل می‌شوند.

$$w = \text{reshape}(x(1:24), 6, 4) \quad (۴-۵۲)$$

$$V = \text{reshape}(x(25:42), 3, 6) \quad (۴-۵۳)$$

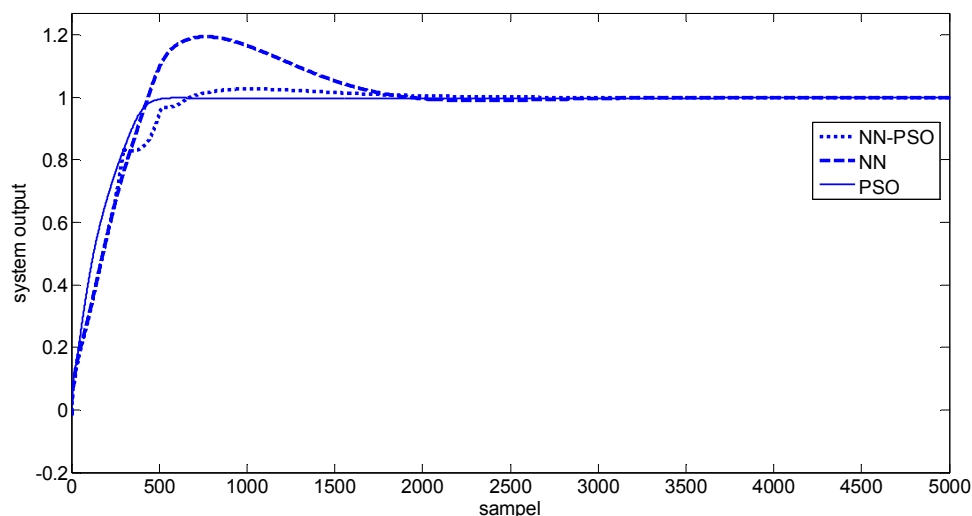
$$B = \text{reshape}(x(43:45), 3, 1) \quad (۴-۵۴)$$

که در روابط فوق x ذره، w وزنهای لایه اول، V وزنهای لایه دوم و B بایاس لایه دوم می‌باشند.

بنابراین اگر بهینه سازی را با 20 ذره شروع کنیم جمعیت اولیه یک ماتریس 20×45 می‌باشد که تعداد سطرها برابر تعداد ذره‌ها و تعداد ستون‌ها بُعد فضای جستجو می‌باشد.

حال هر ذره را به عنوان وزنهای اولیه شبکه عصبی به شبکه عصبی اعمال شده و شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا به ادامه مسأله می‌پردازد بعد از اینکه به شرایط توقف رسید خطای حاصل از آن ذخیره شده و ذره بعدی به شبکه اعمال می‌شود و این روند برای همه ذرات ادامه می‌یابد تا بهترین ذره مشخص شود و این بهترین ذره ذخیره شده و سپس ذرات به روز شده دوباره تک تک ذرات به شبکه عصبی اعمال می‌شوند. و این روند تا 50 تکرار ادامه می‌یابد و نتایج آنها در شکلهای زیر نمایش داده شده است.

همانطور که در شکل (۴-۲۳) مشخص است پاسخ پله توربین وقتی کنترل کننده آن را فقط شبکه عصبی تنظیم می‌کند پاسخ نامناسبتری نسبت به کنترل کننده‌ای که وزنهای اولیه آن با استفاده از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات بهینه شده اند دارد. مقدار تابع هزینه یعنی انتگرال قدر مطلق خطا به میزان $24/71$ درصد کاهش یافته و این موضوع نشان می‌دهد که بهینه سازی وزنهای اولیه توسط الگوریتم PSO بسیار موثر بوده است. جدول (۴-۸) مقادیر تابع هزینه و ضرایب کنترل کننده PID را در هر دو حالت نشان می‌دهد.



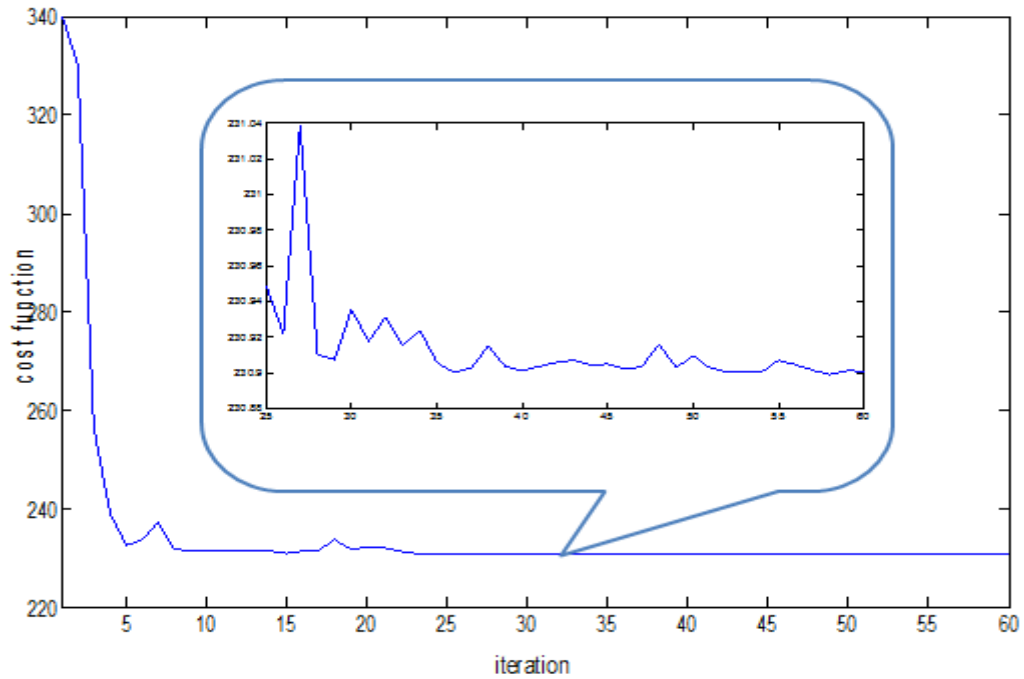
شکل (۴-۲۳) پاسخ پله سیستم برای کنترل کننده‌های طراحی شده با شبکه عصبی، شبکه عصبی بهینه شده و PSO

جدول (۴-۸) ضرایب کنترل کننده PID برای شبکه عصبی و شبکه عصبی بهینه شده

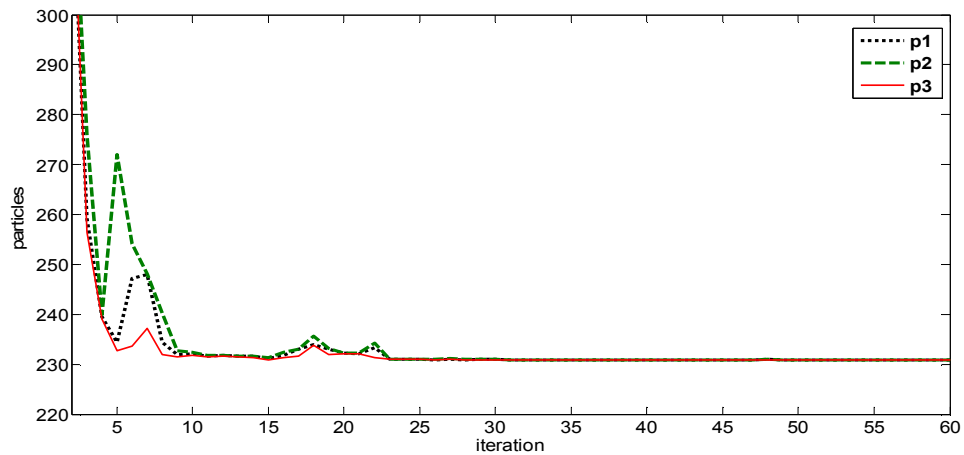
روش بهینه سازی	Kp	Ki	Kd	IAE	زمان اجرا
شبکه عصبی	۲/۸۴۳	۰/۳۴۵	۱/۸۴۶	۳۰۸/۰۱۰۹	۴۰ ثانیه
شبکه عصبی-PSO	۴/۲۱۳	۰/۸۸۳۲	۵	۲۳۱/۸۹۷۳	۳۸ دقیقه

در شکل (۴-۲۴) روند بهینه سازی وزنه‌های شبکه عصبی توسط الگوریتم PSO نمایش داده شده است. همچنین در این شکل تکرارهای ۲۵ تا ۶۰ مقدار تابع هزینه بزرگنمایی شده که نشان از تغییرات بسیار کوچک حول نقطه بهینه می‌دهد. یعنی اینکه در تکرارهای آخر شعاع حرکت ذرات بسیار کوچک شده است.

در شکل (۴-۲۵) مقادیر سه ذره مختلف را نشان می‌دهد که به سمت نقطه بهینه در حرکت هستند و در نهایت هر سه تقریباً به نقطه بهینه می‌رسند.



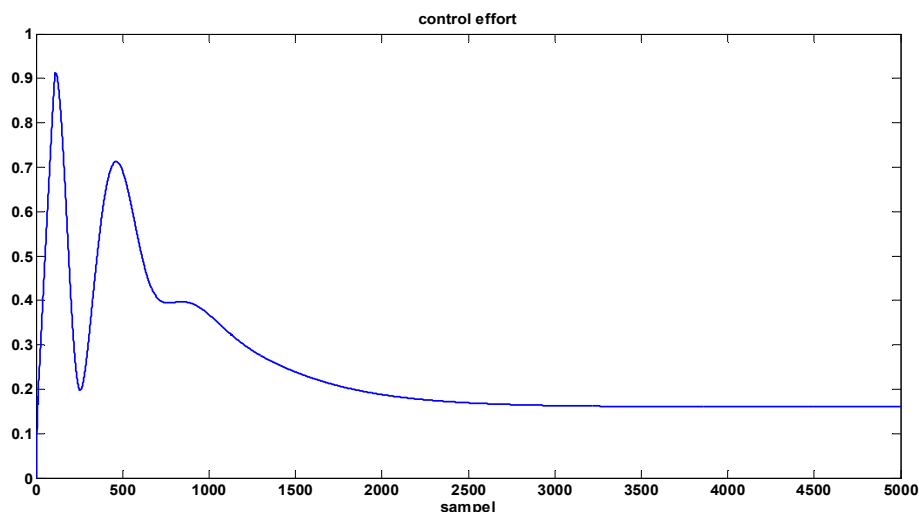
شکل (۴-۲۴) نرخ تغییرات تابع هزینه الگوریتم PSO برای بهینه سازی وزنه‌های اولیه شبکه عصبی



شکل (۴-۲۵) حرکت سه ذره مختلف به سمت نقطه بهینه

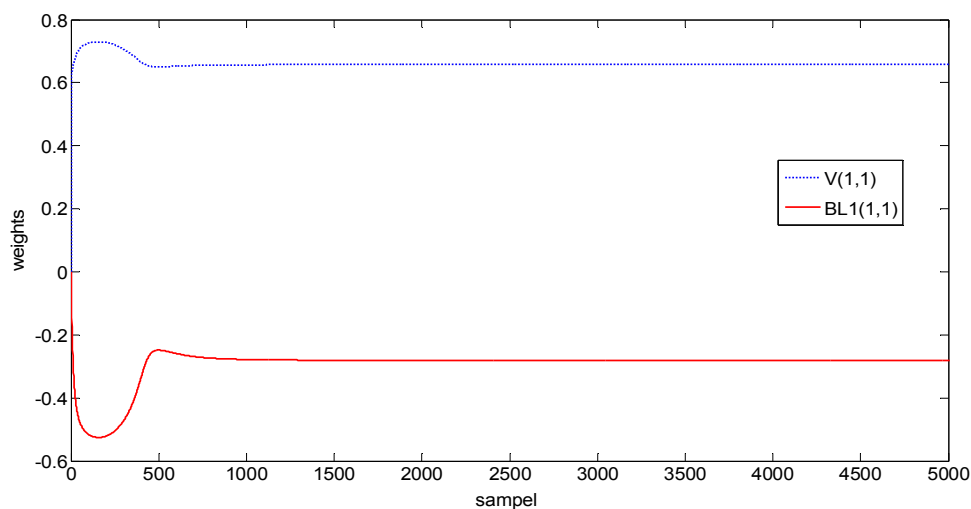
در شکل (۴-۲۶) تغییرات سیگنال کنترل یعنی خروجی PID نمایش داده شده است که کاملاً مشخص است در

لحظات اولیه تغییرات زیادی داشته تا بتواند به مقدار لازم برای کنترل سیستم برسد.



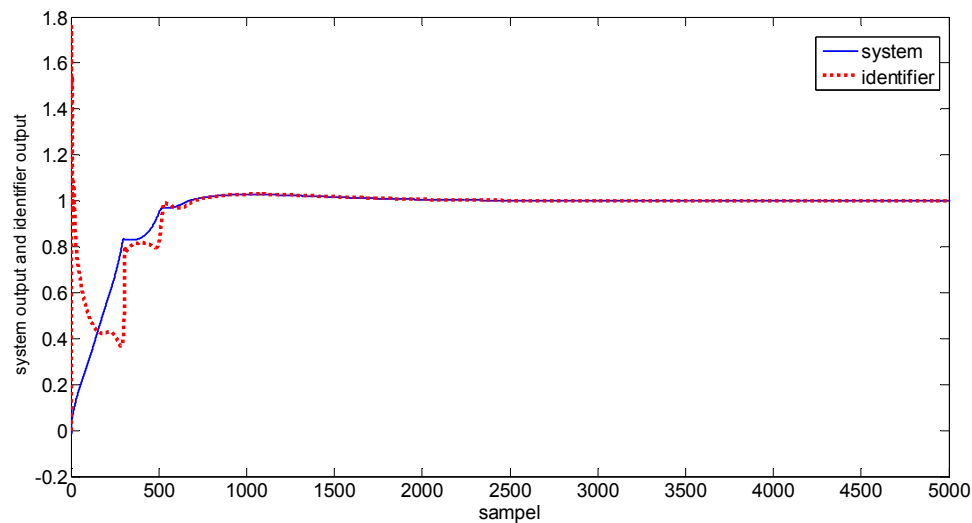
شکل (۴-۲۶) تغییرات سیگنال کنترل

در شکل (۴-۲۷) نمودار تغییرات دو نمونه از وزنه‌های شبکه عصبی شناساگر نمایش داده شده است. که نشان دهنده‌ی این موضوع هستند که هر دو وزن همگرا می‌شوند. این دو وزن به دلخواه انتخاب شده اند یکی از آنها درایه اول ماتریس وزنه‌های لایه دوم است و یکی از وزنه‌ها بایاس نرون اول لایه یک می‌باشد.



شکل (۴-۲۷) نرخ همگرایی دو نمونه از وزنه‌های شبکه عصبی شناساگر

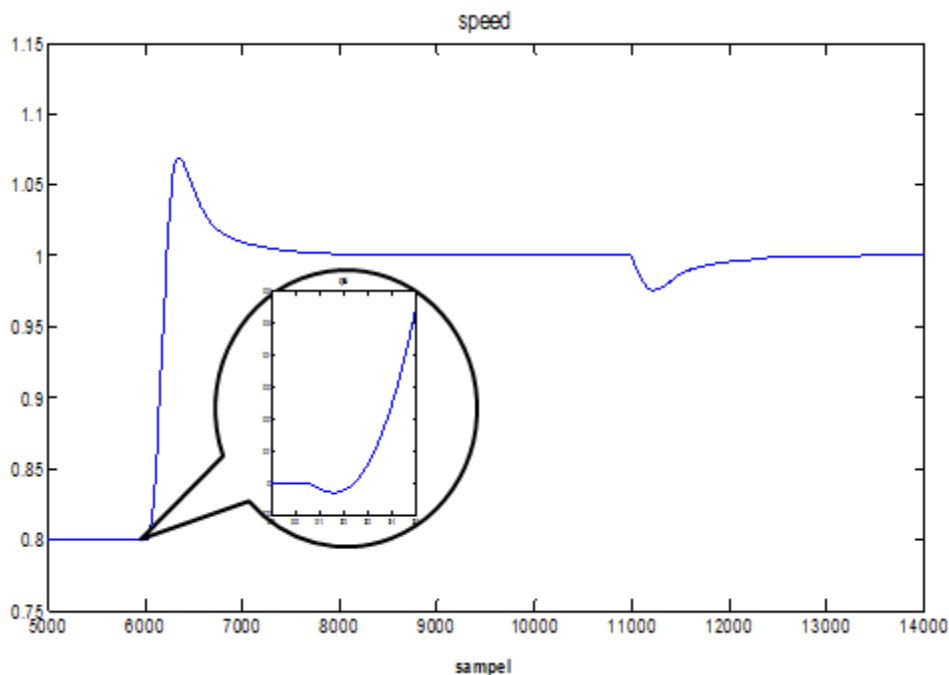
در شکل (۴-۲۸) نحوه شناسایی سیستم را نشان می‌دهد که در نهایت تقریباً بر هم منطبق شده‌اند و صحیح بودن مقدار مشتق سیستم برای آموزش شبکه عصبی کنترل‌کننده را تضمین می‌کند.



شکل (۴-۲۸) خروجی سیستم و شبکه عصبی شناساگر که با شبکه عصبی بهینه شده کنترل شده

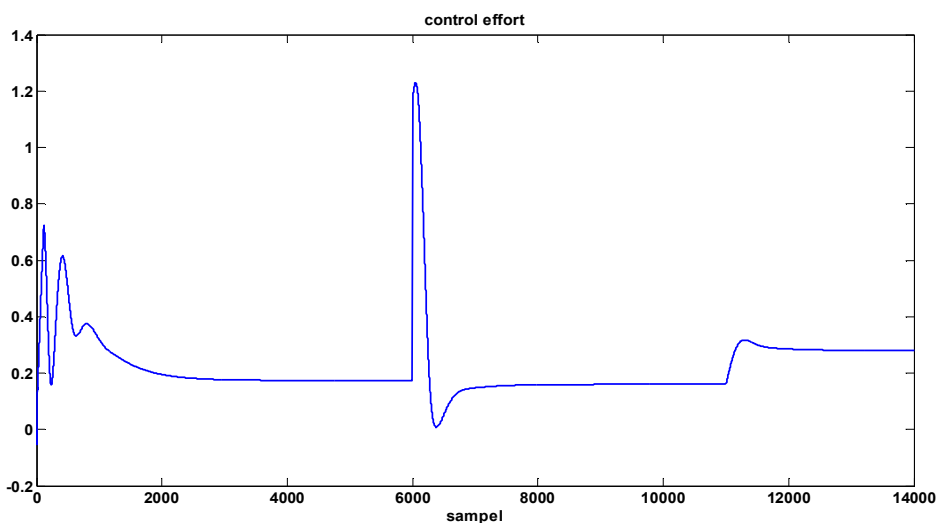
۴-۷ بررسی عملکرد کنترل کننده به ازای تغییرات ناگهانی بار و تغییر نقطه تنظیم

در این بخش ابتدا نقطه تنظیم ورودی را $0/8$ در نظر گرفته و 60 ثانیه (نمونه 6000) بعد نقطه تنظیم ورودی را تغییر داده تا عملکرد کنترل کننده را بررسی کنیم. شکل (۴-۲۹) نشان می دهد که خروجی سیستم ورودی را در کمتر از 20 ثانیه به طور کامل دنبال می کند و در ثانیه 110 (نمونه 11000) بار را به صورت پالس افزایش می دهیم و در شکل (۴-۲۹) نشان داده شده است که ابتدا سرعت افت کرده ولی بعد از تقریباً 12 ثانیه سرعت به مقدار اولیه بر می گردد. لازم به ذکر است تغییرات بار با تغییر مقدار $Pe1$ به سیستم اعمال می شود.



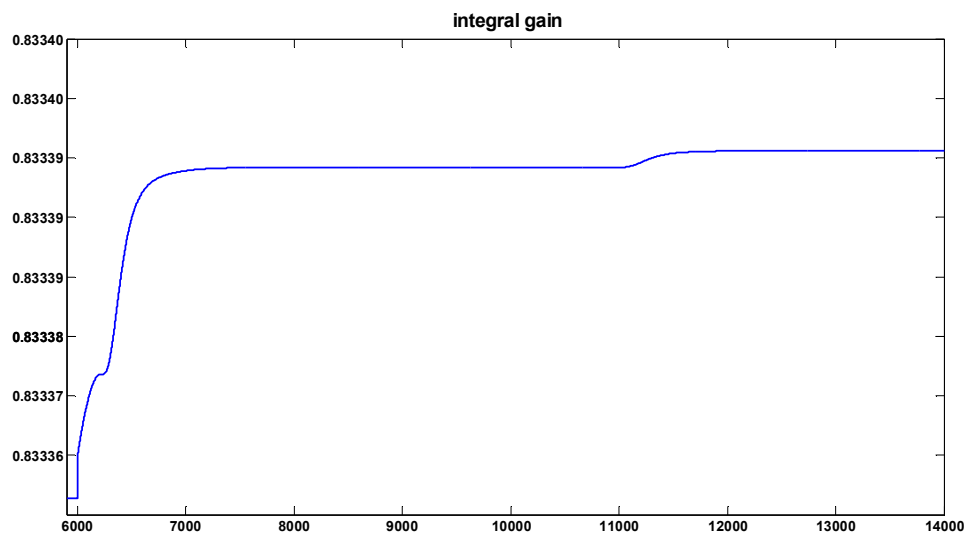
شکل (۴-۲۹) تغییرات خروجی سیستم به ازای تغییر نقطه کار و افزایش ناگهانی بار

در شکل (۴-۳۰) نمودار تغییرات سیگنال کنترل به ازای تغییر نقطه تنظیم و تغییر ناگهانی بار نمایش داده شده است.



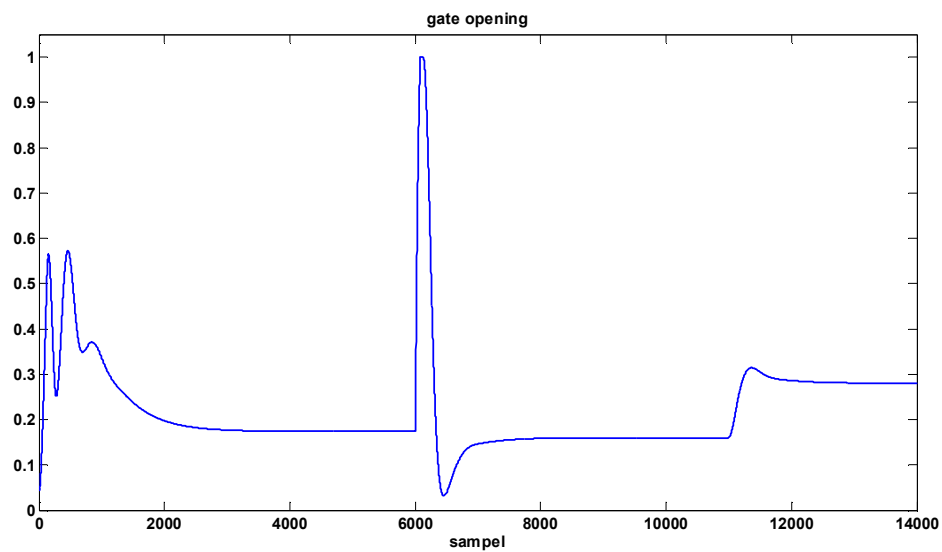
شکل (۴-۳۰) نمودار تغییرات سیگنال کنترل به ازای تغییر نقطه تنظیم و تغییر ناگهانی بار

در شکل (۴-۳۱) نمودار تغییرات ضریب انتگرال گیر نمایش داده شده و روند به روز شدن این ضریب در کل مشخص می‌باشد. تغییرات ضرایب مشتق گیر و بهره تناسبی به علت تکراری بودن موضوع نمایش داده نشده‌اند.



شکل (۴-۳۱) روند تغییرات ضریب انتگرال گیر به ازای تغییر نقطه تنظیم و تغییر ناگهانی بار

شکل (۴-۳۲) باز شدن گیت را به ازای تغییرات بار و تغییر نقطه تنظیم نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است بعد از اینکه مقدار بار افزایش پیده کرده مقدار باز شدن گیت نیز بیشتر شده تا نیروی لازم برای به حرکت درآوردن توربین را فراهم نماید.



شکل (۴-۳۲) نمودار باز شدن گیت به ازای تغییرات بار و تغییر نقطه تنظیم

فصل پنجم

نتایج و

پیشنهادات

الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی انبوه ذرات و شبکه عصبی به مساله طراحی کنترل کننده PID برای کنترل سرعت توربین آبی اعمال شدند. هدف طراحی تعیین ضرایب کنترل کننده به گونه ایی بود که انتگرال قدر مطلق خطا کمینه شود. نتایج حاکی از آن بودند که الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات بیشترین نرخ همگرایی را داشته و همچنین شبکه عصبی بیشترین سرعت همگرایی را داشته است.

برای آموزش شبکه عصبی از الگوریتم پس انتشار خطا استفاده شد. از آنجاییکه الگوریتم پس انتشار به شدت به نقطه شزوع وابسته است اگر از یک نقطه نامناسب شروع به کار کند امکان در دام افتادن نقطه بهینه محلی برای آن وجود دارد. بنا براین از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات برای بهینه سازی وزنه‌های اولیه شبکه عصبی استفاده شد تا دقت و سرعت در بهینه سازی کنترل کننده وجود داشته باشد که نتایج نشان دادند که این امر تحقق یافت. یعنی دقت کنترل کننده ای که با ترکیب الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات و شبکه عصبی طراحی شد عملکرد مناسبتری نسبت به کنترل کننده ای که فقط با شبکه عصبی طراحی شد داشت.

در این پایان نامه از یک پنستاک برای فراهم کردن آب مورد نیاز یک توربین استفاده شد. اگر در نیروگاهی یک پنستاک آب مورد نیاز چند توربین را همزمان فراهم کند در این صورت برای کنترل سرعت توربینها با یک سیستم کنترل چند متغیره روبرو هستیم که طراحی آن دشوار است. و استفاده از الگوریتم های ژنتیک و بهینه سازی انبوه ذرات و همچنین ترکیب آنها با شبکه عصبی می تواند راهکار ثمر بخشی برای طراحی این کنترل کننده ها باشد.

کارهای آینده می تواند اینگونه باشد که ابتدا از الگوریتم های استفاده شده در این پایان نامه برای کنترل مدلهایی که در آنها لوله ارتجاعی بوده و آب نیز تراکم پذیر باشد به کار برد.

کنترل کننده مورد استفاده در این پایان نامه کنترل کننده PID بود. فقط با استفاده از الگوریتمهای هوشمند ضرایب آن بهینه شد. چون سیستم کاملا غیر خطی می باشد به عنوان یک کار آینده میتوان از کنترل کننده ای غیر خطی که توسط شبکه عصبی قابل پیاده سازی است استفاده نمود.

پیوست

فشار و سرعت در مجاری آب

در نظر گرفتن تئوری ای که سرعت چرخ توربین را با عملکرد دینامیکی آب مرتبط می سازد از اهمیت خاصی برخوردار است. که این تئوری در این فصل به صورت مفصل توضیح داده می شود.

گذار هیدرولیکی در یک سیستم مجرای آب بسته، زمانی اتفاق می افتد که نقطه کار پایدار سیستم تغییر می کند. میرایی فشار گذرا زمانی اتفاق می افتد که انرژی سیستم به علت اصطکاک تلف می شود. نیروگاه های آبی با کانال آب طولانی دارای ضربه شدید بوده و پایداری سیستم گاورنر مشکل می باشد. روش کلاسیک حل این مشکل قرار دادن تانک تعادل در طبقه بالا یا پایین نیروگاه می باشد که باعث مینیمم شدن تاثیر گذار هیدرولیکی می شود [۹].

این بخش شامل استنباط ریاضی معادلات توصیف کننده حالت جریان آب گذرا از تانک تعادل و سیستم مجرای آب بسته که شامل اثر موج سیال و تلفات اصطکاک است. این معادلات معمولاً پیوسته و لحظه ای می باشند.

۱- اساس گذار هیدرولیکی

۱-۱ سرعت موج فشار در کانال آب

سرعت موج فشار α بستگی به: ساختار مایع، مانند مدول Bulk و چگالی و مشخصات کانال (شامل: قطر داخلی کانال، ضخامت دیواره کانال، جنس دیواره کانال) دارد [۹].

$$\alpha = \frac{K}{\rho(1 + \frac{DK}{eE})} \quad (1)$$

که α سرعت موج فشاری، K مدول بالک، D قطر داخلی لوله، e ضخامت دیواره لوله، E مدول یانگ و ρ چگالی جرم مایع می باشد.

سرعت موج برای یک لوله کاملاً سخت، که دارای E بی نهایت است به صورت زیر ساده می شود.

$$\alpha = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2)$$

مقدار نوعی سرعت موج فشار از ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ متر بر ثانیه است.

۱-۲ انتشار موج و انعکاس آن در کانال

ضربه قوچ یک پدیده حاصل از تغییر فشار در لوله های بسته است که به علت باز و بسته شدن یک شیر یا تغییر ناگهانی سرعت آب درون لوله و یا هر عامل تغییر دهنده ناگهانی فشار به وجود می آید. در اثر این پدیده امواج فشاری مثبت و منفی بوجود می آیند که در لوله جلو و عقب رفته تا زمانی که توسط افت اصطکاکی داخل لوله از بین بروند. زمانی که یک دریچه بطور ناگهانی در لوله هدایت آب بسته می شود ارتفاع فشاری سریعاً بر خلاف جریان درون لوله افزایش پیدا کرده و در اثر برخورد با مانع تغییر جهت داده و نوسانات ادامه می یابد تا جائیکه امواج فشاری از بین بروند. در اثر این بسته شدن ناگهانی کاهش فشار نیز در سمت پایین دست دریچه ایجاد می گردد که این موج فشاری نیز به سمت سطح آزاد آب در پایین دست حرکت می نماید. در صورتیکه دریچه خیلی سریع بسته شود به علت کاهش فشار در پایین دست جریان، آب تبخیر و یک توده بخار تشکیل می گردد. در حالتیکه افت اصطکاکی در داخل لوله وجود نداشته باشد این تغییرات نوسانی ادامه خواهند داشت ولی در حقیقت اصطکاک جداره داخلی موجب میرا شدن این امواج می گردد.

تحلیل ضربه قوچ زود گذر در لوله های ساده با یک مخزن باز در بالا دست و یک شیر در پایین دست به صورت زیر است.

زمانیکه موج فشاری در طول لوله پنستاک حرکت می کند تا به سطح آزاد آب برسد با رابطه زیر بیان می گردد [۱۰-۲۰]:

$$T_e = \frac{L}{a} \quad (3)$$

زمان تناوب یک موج فشاری درون لوله در صورتیکه قطر لوله ثابت باشد و ضخامت لوله نیز ثابت باشد برابر است با:

$$T_{th} = \frac{4L}{a} \quad (4)$$

۳-۱ تلفات ناشی از اصطکاک

تلفات ناشی از اصطکاک را از رابطه داریسی - ویسباخ^{۲۹} بدست می‌آوریم.

$$H_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (۵)$$

که V سرعت موج، f ضریب اصطکاک عددی و H_f افت انرژی در لوله است.

فاکتور f که بدون بعد است تابعی است از سرعت موج، سختی کانال، ویسکوزیته (ناروانی) مایع و قطر کانال. ارزیابی فاکتور اصطکاک تحت شرایطی که تغییرات گسترده باشد با عدد رینولدز^{۳۰} بیان می‌شود. معیار رینولدز نسبت نیروی اینرسی در هر واحد حجم به نیروی ویسکوزیته در هر واحد حجم می‌باشد. فاکتور اصطکاک برای یک جریان سطحی مستقل از سختی دیواره کانال می‌باشد و نسبت معکوس با عدد رینولدز دارد. فاکتور اصطکاک برای جریان لایه ای از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (۶)$$

برای یک جریان متلاطم که عدد رینولدز بیشتر از ۴۰۰۰ است f تابعی است از عدد رینولدز و نسبت سختی به قطر داخلی. معادله زیر ارتباط بین فاکتور اصطکاک، عدد رینولدز و سختی لوله را بیان می‌کند [۹].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (۷)$$

۴-۱ سیستم با مجاری آب بسته

۴-۱-۱ فرضیات پایه

برای بدست آوردن قوانین فیزیکی گذار هیدرولیکی در یک کانال بسته، فرض شده است که:

۱- کانال یکپارچه است و جریان آب تک بعدی است؛ برای مایعات شبه تراکم ناپذیر، توزیع سرعت و فشار

یکپارچه است.

^{۲۹} Darcy- weisbach

^{۳۰} Reynolds

۲- تغییر شکل کانال متناسب است با فشار و تاثیرات تراکم پذیری مایع که با ثابت مدول نمایش داده می شود.

۳- هیچ گونه تبخیری در مدت گذار هیدرولیکی صورت نمی گیرد.

۴- رابطه‌های استفاده شده در محاسبه تلفات ارتفاع (اصطکاک) در حالت پایدار، در طول مدت گذار هیدرولیکی استفاده می‌شوند.

۵- از جریان کناری صرف نظر می‌کنیم.

۶- آنالیز گذرا در یک کانال بسته به دو صورت می‌باشد: سیستم توزیع شده و سیستم یکپارچه. در سیستم توزیع شده، پدیده گذار به صورت موج سیار می‌باشد. فرض می‌شود که هر تغییری در شرایط جریان آب به طور لحظه‌ای در کل سیستم یکپارچه وجود دارد. معادلات دیفرانسیل جزئی توصیف کننده یک سیستم گسترده می‌باشند، در صورتیکه در یک سیستم یکپارچه برای توصیف سیستم از معادلات دیفرانسیل جزئی استفاده می‌کنیم. اگر $\frac{\omega L}{a}$ خیلی کمتر از یک باشد سیستم یکپارچه می‌باشد.

۱-۴-۲ معادلات دیفرانسیل پایه ای برای جریان گذرا

معادلات دیفرانسیل پیوسته جزئی بر حسب دو متغیر وابسته، سرعت جریان V و فشار p و دو متغیر مستقل، زمان t و جابجایی X بیان می‌شوند.

۱-۲-۴-۱ معادلات پیوستگی

از معادلات پیوستگی کنترل حجم V_c در لحظه t نشان داده شده در شکل (۱) نتیجه می‌گیریم [۷]:

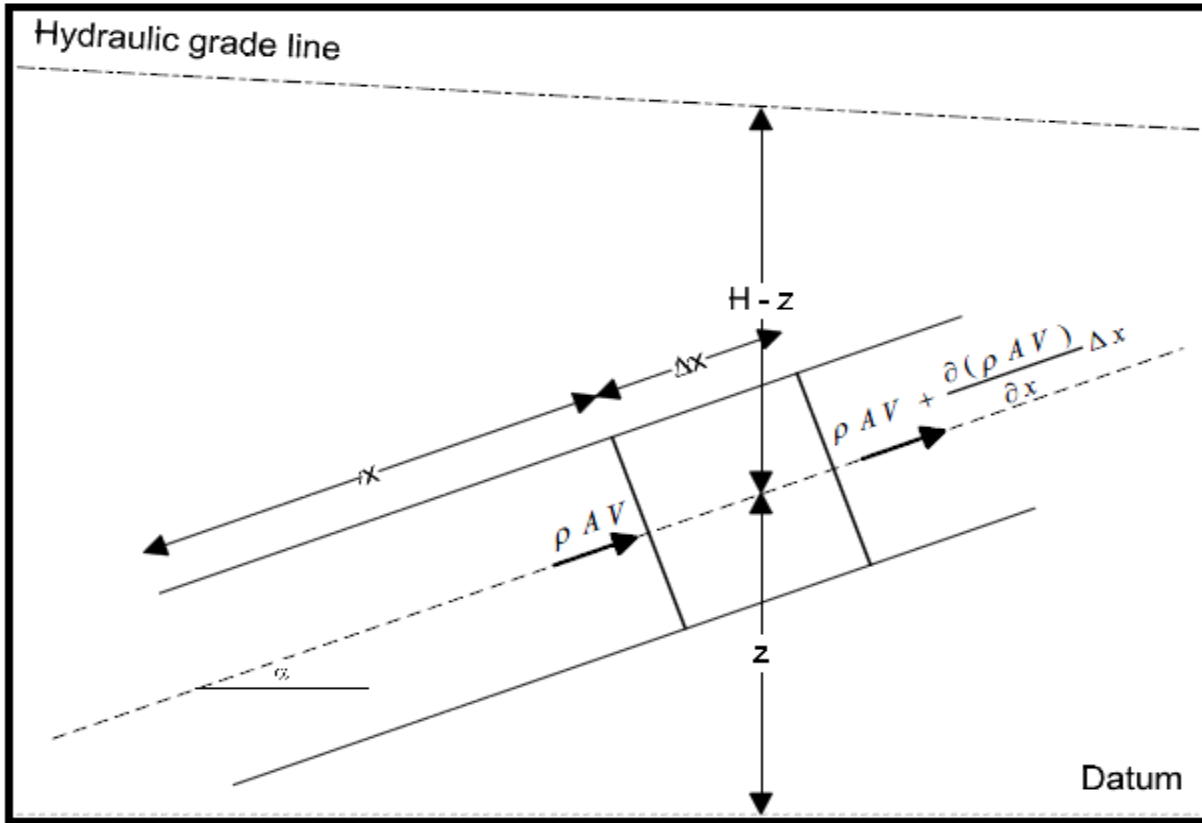
$$\rho AV = \rho AV + \frac{\partial}{\partial t} \rho AV (\Delta X) \quad (۸)$$

با بسط معادله (۸)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho AV) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho AV) = A \frac{\partial}{\partial t} + \rho \frac{\partial A}{\partial t} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} + \rho V \frac{\partial A}{\partial x} + AV \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (۹)$$

اگر دو طرف معادله را بر ρA تقسیم کنیم رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (10)$$



شکل (۱) کنترل حجم برای استنباط معادلات پیوستگی [۹]

برای یک کانال دایره ای با شعاع r

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi r \frac{dr}{dt} \quad (11)$$

معادله (۱۱) را به صورت زیر باز نویسی می کنیم، که ϵ تنش دیواره کانال ناشی از فشار آب می باشد

$$\frac{dA}{dt} = 2\pi r \frac{dr}{dt} = 2A \frac{d\epsilon}{dt} \quad (12)$$

اگر جداره کانال را به صورت خطی قابل انبساط فرض کنیم:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E - \frac{\rho D}{2e}} \frac{D}{2e} \frac{dp}{dt} \quad (13)$$

عبارت اول معادله (۲-۱۰) نشان می دهد که کانال با زمان متغیر است.

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} = \frac{1}{E - \frac{\rho D}{2e}} \frac{D}{e} \frac{d\rho}{dt} \quad (14)$$

عبارت دوم معادله (۱۰) نرخ تغییرات مایع را نسبت به چگالی نشان می دهد. مدول بالک کشسان یک مایع با رابطه زیر تعریف می شود.

$$k = \frac{dp}{dV/V} = \frac{d\rho}{d\rho/\rho} \quad (15)$$

ترم دوم معادله (۱۰) به صورت زیر تبدیل می شود:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{k} \frac{d\rho}{dt} \quad (16)$$

با جایگزینی معادله (۱۴) و (۱۶) در رابطه (۱۰) معادله زیر بدست می آید.

$$\left(\frac{1}{K} + \frac{1}{\frac{eE}{D} - \frac{\rho}{2}} \right) \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial X} = 0 \quad (17)$$

از آنجائیکه در بیشتر کاربردها $\rho/2 \ll eE/D$ می باشد معادله (۱۷) به صورت زیر تبدیل می شود.

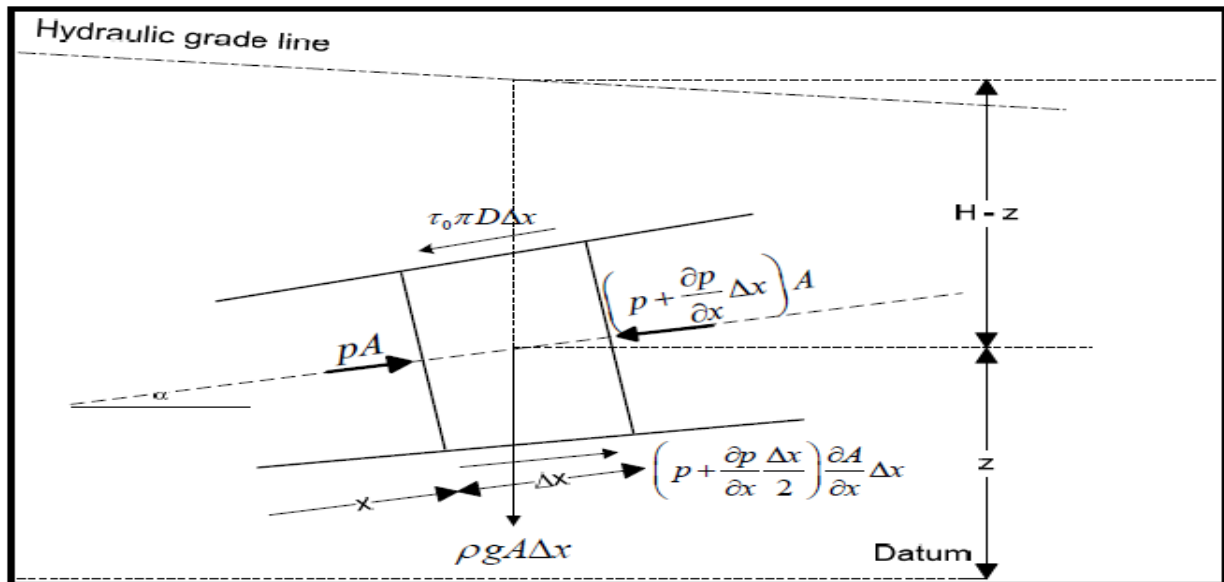
$$\frac{1}{K} \left(1 + \frac{1}{\frac{eE}{D}} \right) \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

با جایگزینی معادله (۱) در رابطه (۱۸) و مشتق گیری از آن رابطه (۱۹) بدست می آید. پارماکیان (۱۹۵۵) نشان داد در حالتی که لوله قابل تغییر شکل تحت ازدیاد فشار حاصل از ضربه قوچ در نظر گرفته شود و آب نیز قابل تراکم فرض شود معادله تعادل یک جزء آب به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + V \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

۱-۴-۲-۲ معادلات حرکت سیال

معادله دیفرانسیل سیال، برای یک جریان گذرا با استفاده از قانون دوم نیوتن برای یک جزء آب در درون کانال بدست می آید.



شکل (۲) شکل مربوط به محاسبات حرکت سیال [۹]

معادلات حرکت برای کنترل حجم آب در زمان t در شکل (۲) تعریف شده است، در حالیکه کانال تحت نیروی گذار هیدرولیکی تغییر شکل یافته است.

$$\rho A - \left(p - \Delta x \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \right) A + \left(p + \Delta x \frac{1}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{\partial A}{\partial x} \Delta x - \tau_0 \pi D \Delta x + p g A \Delta x \sin \alpha = (20)$$

$$A \Delta x \frac{dv}{dt}$$

با حذف Δx^2 از معادله (۲۰) رابطه زیر را بدست می آوریم:

$$\frac{\partial p}{\partial x} A + \tau_0 \pi D + \rho g A \sin \alpha + \rho A \frac{dv}{dt} = 0 \quad (21)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{8} f \rho V |V| \quad (22)$$

با جایگزینی معادله (۲۲) در معادله (۲۱) و تقسیم دو طرف معادله بر ρA نتیجه می گیریم:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \alpha + \frac{fV}{2D} |V| = 0 \quad (23)$$

۱-۴-۲-۳ تبصره‌های کلی

در بیشتر کاربردهای مهندسی $V(\partial p/\partial x)$ و $V(\partial V/\partial x)$ در مقایسه با بقیه عبارات قابل نظر هستند، از شیب α نیز ممکن است چشم پوشی شود. پارمترهای سیستم مانند ρ و D نسبت به زمان ثابت هستند. بنابر این با حذف این عبارات از معادله‌های (۱۹) و (۲۳) روابط زیر بدست می‌آیند [۸-۱۰].

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{fV}{2D} |V| = 0 \quad (25)$$

در آنالیز گذار هیدرولیکی، فشار درون لوله معمولاً با ارتفاع از سطح دریا سنجیده می‌شود. و علاوه بر آن سرعت جریان آب با مقدار تخلیه Q جایگزین می‌شود. فشار و سرعت جریان آب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$p = \rho g(H - z) \quad (26)$$

$$Q = VA \quad (27)$$

مایع به مقدار ناچیزی قابل تراکم است و جداره‌ی کانال نیز تقریباً قابل انبساط نیست و با نادیده گرفتن تغییرات چگالی مایع ρ ، تغییرات سطح مقطع نیز ناچیز می‌باشد. با جایگزینی معادلات (۲۶) و (۲۷) در معادلات (۲۴) و (۲۵) روابط زیر بست می‌آیند:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial z}{\partial t} \right) + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (28)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \left(\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{fQ}{2DA^2} |Q| = 0 \quad (29)$$

اگر محور لوله ثابت باشد $\partial z/\partial t = 0$ و $\partial z/\partial x = \sin \alpha$. حذف تاثیر انحراف لوله ممکن می‌شود و $\partial z/\partial x = 0$ بنا بر این معادله (۲۸) و (۲۹) به صورت زیر تبدیل می‌شوند:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{gA}{a^2} \frac{dH}{dt} = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{fQ}{2gDA^2} |Q| = 0 \quad (31)$$

اگر معادله‌های (۳۰) و (۳۱) را با جایگزینی $h=H/H_0$ و $q=Q/Q_0$ نرمالیزه کنیم روابط زیر به دست می‌آیند.

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{gA}{a^2} \frac{H_0}{Q_0} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{Q_0}{gAH_0} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{f}{2gDa^2} \frac{Q_0^2}{H_0} q|q| = 0 \quad (33)$$

ثابت زمانی آب یا زمان راه اندازی آب، T_w ، وابسته به زمان شتاب آب درون پنستاک، که حد فاصل بین دهانه توربین و سد یا تانک تعادل، هرکدام که وجود داشته باشند، می باشد. معادله زمان راه اندازی آب به صورت زیر است:

$$T_w = \frac{L}{gA} \frac{Q_0}{H_0} \quad (34)$$

با جایگذاری T_w در روابط (32) و (34) روابط زیر را بدست می آوریم:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{1}{a^2} \frac{L}{T_w} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{T_w}{L} \frac{\partial q}{\partial t} + f \frac{T_w}{L} \frac{Q_0}{2AD} q|q| = 0 \quad (36)$$

۱-۴-۳ مدل ریاضی

آنالیز گذرا در سیستم های هیدرو الکتریکی به دو زیر سیستم تقسیم می شود یکی پاسخ نوسان جرم و یکی پاسخ ضربه قوچ. معادلات دیفرانسیل معمولی مدل ریاضی نوسان جرم (تئوری ستون آب صلب) بین سد و تانک ضربه ای را توصیف می کنند. معادلات دیفرانسیل جزئی مدل ریاضی ضربه قوچ در طول پنستاک و لوله درافت^{۳۱} را نشان می دهند. مدل ریاضی سیستم کانال بسته با استفاده از آنالیز ضربه قوچ، در نظر گرفتن تلفات ارتفاع و خطی سازی معادلات (35) و (36) بدست می آید.

تبدیل لاپلاس معادلات (35) و (36) به صورت زیر می باشد.

$$\frac{\partial q(s)}{\partial x} + \frac{1}{a^2} \frac{L}{T_w} (sh(s) - h(0^+)) = 0 \quad (37)$$

^{۳۱} Draft tube

$$\frac{\partial h(s)}{\partial x} + \frac{T_w}{L} (sq(s) - (0^+)) + f \frac{T_w}{L} \frac{Q_0}{2AD} q(s) = 0 \quad (38)$$

عبارت سوم معادله (38) نشان دهنده تلفات ارتفاع ناشی از اصطکاک می باشد. با فرض حالت پایدار اولیه یعنی

$$h(0^+) = q(0^+) = 0$$

روابط زیر را نتیجه می گیریم:

$$\frac{\partial q(s)}{\partial x} + \frac{1}{a^2} \frac{L}{T_w} sh(s) = 0 \quad (39)$$

$$\frac{\partial h(s)}{\partial x} + \frac{T_w}{L} \left(s + f \frac{Q_0}{2AD} \right) q(s) = 0 \quad (40)$$

اگر از معادله دیفرانسیل (40) نسبت به x مشتق بگیریم:

$$\frac{\partial h(s)^2}{\partial x^2} = \frac{T_w}{L} \left(s + f \frac{Q_0}{2AD} \right) \frac{\partial q(s)}{\partial x} \quad (41)$$

اگر $\partial q(s)/\partial x$ را از معادله (39) در معادله (41) جایگزین کنیم:

$$\frac{\partial^2 h(s)}{\partial x^2} = \frac{1}{a^2} \left(s^2 + f \frac{Q_0}{2AD} s \right) h(s) \quad (42)$$

متغیر z را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$z^2 = s^2 + \frac{fQ_0}{2DA} s \quad (43)$$

جواب عمومی معادله هموزن مرتبه دوم (42) به این صورت است:

$$h(s) = c_1 e^{\frac{zx}{a}} + c_2 e^{-\frac{zx}{a}} \quad (44)$$

اگر از معادله (44) مشتق بگیریم:

$$\frac{\partial h(s)}{\partial x} = c_1 \frac{z}{a} e^{\frac{zx}{a}} - c_2 \frac{z}{a} e^{-\frac{zx}{a}} \quad (45)$$

باجایگزینی $\partial h(s)/\partial x$ از معادله (45) در معادله (40)، رابطه زیر بدست می آید:

$$q(s) = \frac{L}{aT_w} \frac{s}{z} \left(c_1 e^{\frac{zx}{a}} - c_2 e^{-\frac{zx}{a}} \right) \quad (46)$$

فشار آب و نرخ جریان در دهانه ورودی کانال یعنی در $x=0$ برابر است با:

$$h_u(s) = C_1 + C_2 \quad (47)$$

$$q_u(s) = \frac{L}{aT_w} \frac{s}{z} (C_1 - C_2) \quad (48)$$

فشار آب و نرخ جریان در دهانه خروجی کانال یعنی در $x=L$ برابر است با:

$$h_D(s) = C_1 e^{\frac{zL}{a}} + C_2 e^{-\frac{zL}{a}} \quad (49)$$

$$q_D(s) = \frac{L}{aT_w} \frac{s}{z} \left(c_1 e^{\frac{zL}{a}} - c_2 e^{-\frac{zL}{a}} \right) \quad (50)$$

C_1 و C_2 را از معادله فوق بدست می‌آوریم:

$$C_1 = \frac{1}{2} e^{-\frac{zL}{a}} h_D(s) + \frac{1}{2} \frac{aT_w}{L} \frac{z}{s} e^{-\frac{zL}{a}} q_D(s) \quad (51)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} e^{\frac{zL}{a}} h_D(s) - \frac{1}{2} \frac{aT_w}{L} \frac{z}{s} e^{\frac{zL}{a}} q_D(s) \quad (52)$$

با جایگزینی مقادیر T_e ، C_1 و C_2 از معادلات (3)، (51) و (52) در معادلات (47) و (48) نتیجه می‌گیریم:

$$h_U(s) = \frac{1}{2} (e^{-zT_e} + e^{zT_e}) h_D(s) + \frac{1}{2} \frac{T_w}{T_e} \frac{z}{s} (e^{-zT_e} - e^{zT_e}) q_D(s) \quad (53)$$

$$q_U(s) = \frac{1}{2} \frac{T_e}{T_w} \frac{s}{z} (e^{-zT_e} - e^{zT_e}) h_D(s) + \frac{1}{2} (e^{-zT_e} + e^{zT_e}) q_D(s) \quad (54)$$

توابع تبدیل نرخ جریان و فشار آب، در دهانه ورودی و دهانه خروجی کانال، به صورت ماتریس زیر تعریف

می‌شوند:

$$\begin{bmatrix} h_U(s) \\ q_U(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(zT_e) & -Z_c \sinh(zT_e) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(zT_e) & \cosh(zT_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_D(s) \\ q_D(s) \end{bmatrix} \quad (55)$$

که امپدانس مشخصه کانال برابر است با:

$$Z_c = \frac{T_w}{T_e} \frac{z}{s} \quad (56)$$

حل کلاسیک معادله مشتق جزئی موج، در حوزه زمان با استفاده از تئوری ضربه قوچ و در نظر گرفتن تلفات

اصطکاک به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -\frac{T_w}{T_e} \left(1 + \frac{fQ_0}{2DAs} \right)^{1/2} \tanh \left(\left(s^2 + s \frac{fQ_0}{2DA} \right)^{1/2} T_e \right) \quad (57)$$

با صرف نظر از تلفات اصطکاک، معادله (۵۷) به صورت زیر ساده می شود:

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -\frac{T_w}{T_e} \tanh(sT_e) \quad (58)$$

در حالتی که ازدیاد فشار کم بوده و انبساط قابل ملاحظه‌ای در جداره خارجی لوله ایجاد نشده باشد و آب نیز تراکم پذیر نباشد آنگاه $\tanh(sT_e) = sT_e$.

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -T_w s - H_f \quad (59)$$

بدون در نظر گرفتن تلفات اصطکاک از معادله (۵۹) نتیجه می گیریم:

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -T_w s \quad (60)$$

۳-۱ سیستم کنترل فشار

پدیده های زود گذر هیدرولیک و تغییرات فشار از قبیل ضربه قوچ را می توان به طرق گوناگون کنترل نمود. کنترل کننده های دریچه ها و گاورنر تنظیم کننده می توانند زمان بسته شدن شیر یا دریچه را به نحوی محدود کنند که در اثر افزایش فشار هیچ صدمه ای ایجاد نشود. در این حالت شیرهای تنظیم کننده فشار که در نزدیک توربین جای داده شده اند مورد استفاده قرار می گیرند. شیر اطمینان می تواند به محفظه حلزونی شکل توربین متصل شده و توسط مکانیزم دریچه ورودی کنترل گردد. این کنترل به گونه ای صورت می گیرد که با ثابت نگه داشتن سرعت از افزایش فشار بیش از حد در پشت دریچه ورودی ممانعت به عمل می آورد.

۱-۳-۱ مخازن خیز آب یا مخازن انبساط (تانک تعادل)

یک روش معمول برای کنترل، استفاده از مخازن خیز آب می باشد. تانک های تعادل لوله ایستاده عمودی هستند که به عنوان یک پیش مخزن و کوتاه کننده مسیر، برای کنترل موج فشاری حاصل از ضربه قوچ عمل می کنند. یک تانک تعادل سه هدف را در نیروگاه برآورده می سازد:

۱- کمک به پایداری جریان توربین

۲- کنترل ضربه قوچ یا تنظیم فشار

۳- کمک به کنترل سرعت .

از نقطه نظر علمی و به عنوان یک قاعده سر انگشتی باید گفت زمانی نیاز به تانک تعادل و یا شیر اطمینان است که مجموع طول لوله‌ها سه برابر ارتفاع نیروگاه باشد. از نظر اقتصادی تانک خیز آب مقرون به صرفه نیست مگر آنکه بیشتر افت ارتفاع در نزدیکی توربین رخ دهد .

سه نمونه تانک تعادل که با یکدیگر اختلاف کمی دارند عبارتند از:

۱- مخزن تعادل ساده

این تانک از یک لوله عمودی ایستاده تشکیل شده است که در انتها به لوله هدایت آب متصل می‌باشد. محل اتصال به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده به نحویکه افت جریان در هنگام ورود به مخزن بسیار اندک می‌باشد. اشکال عمده این نوع مخازن در مقایسه با سایر انواع آن، ناپایداری سطح مخزن می باشد.

۲- مخزن تعادل با اریفیس محدود:

این سیستم نظیر حالت قبل می باشد، با این تفاوت که اتصال بین مخزن و لوله هدایت از طریق یک سوراخ (اریفیس) در کف مخزن بر قرار می‌گردد. این عمل موجب بروز افت زیاد در مدخل تانک می‌گردد. اما در مقابل پایدارترین حالت از انواع مخازن تعادل را تشکیل می دهد .

۳- این نوع تانک ترکیبی از تانک ساده و تانک دارای اوریفیس می‌باشد. در این نوع لوله‌های با قطر کمتر در داخل لوله اصلی واقع شده است و به لوله هدایت آب متصل می‌باشد.

۱-۳-۲ تئوری و آنالیز تانک تعادل

از نظر تئوری نوسانات، حجم آبی که در خط لوله و تانک تعادل وجود دارد به وسیله سه معادله اساسی زیر تعیین می گردد :

۱- معادله دینامیکی

۲- معادله پیوستگی

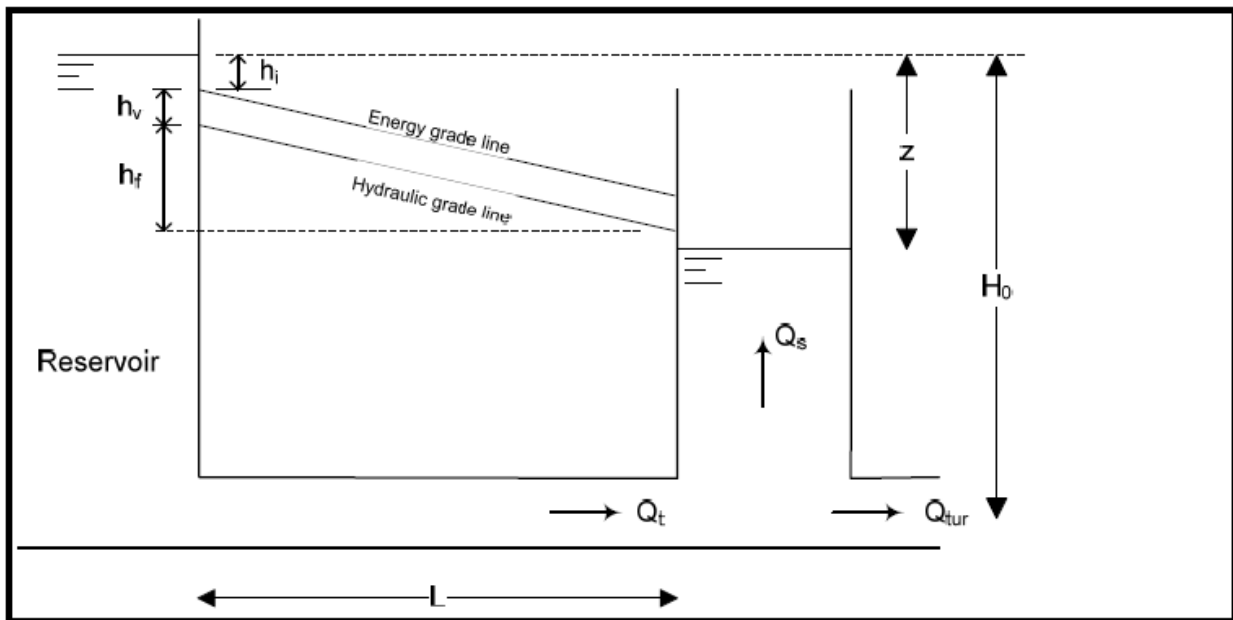
۳- معادله ای که سرعت بالا رفتن آب در تانک تعادل را تعیین کند.

الف - معادله دینامیکی: حال از قانون دوم نیوتن برای ستون آب استفاده می‌نمائیم:

در هر لحظه از نوسان (خواه بر اثر افزایش دبی و یا کاهش دبی بوجود آمده باشد) داریم:

$$\frac{dQ_t}{dt} = \frac{g A_t}{L} (H - z + f Q|Q|) \quad (61)$$

معادله پیوستگی برای نقطه اتصال تانک تعادل و کانال که در شکل (۳) نمایش داده شده است به صورت زیر می‌باشد.



شکل (۳) تانک تعادل ساده

$$Q_t = Q_s + Q_{tur} \quad (62)$$

که در رابطه فوق Q_s جریان ورودی به تانک تعادل است، Q_{tur} جریان آب توربین می‌باشد. از آنجائیکه $Q_s =$

می‌تواند به صورت زیر نوشته شود: معادله (۶۲) $A_s(dz/dt)$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{A_s} (Q_t - Q_{tur}) \quad (63)$$

معادلات (۶۱) و (۶۳) برای تانک تعادل ساده که در بالای توربین واقع شده صدق می‌کنند. دامنه و دوره تناوب آب نوسانی داخل تانک تعادل برای یک سیستم بدون اصطکاک از روابط زیر بدست می‌آید.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g} \frac{A_s}{A_t}} \quad (۶۴)$$

$$Z = Q_0 \sqrt{\frac{L}{g A_s A_t}} \quad (۶۵)$$

۱-۳-۲ مدل ریاضی تانک تعادل

در یک سد با تانک تعادل ساده، جریان ناپایدار را با معادلات دیفرانسیل معمولی مدل می‌نمائیم. معادلات تانک تعادل از معادلات پیوستگی استخراج می‌شوند. با فرض نادیده گرفتن تلفات هیدرولیکی اریفیس و نرمالیزه کردن رابطه (۶۳) نتیجه می‌گیریم که:

$$q = \frac{A_s H_0}{Q_0} \frac{dh}{dt} \quad (۶۶)$$

زمان لازم برای پر شدن تانک T_s با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$T_s = \frac{A_s H_0}{Q_0} \quad (۶۷)$$

تابع تبدیل نرخ جریان آب و ارتفاع آب درون تانک تعادل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{h(s)}{q(s)} = \frac{1}{s T_s} \quad (۶۸)$$

منابع

[۱] مقدس تفرشی، مسعود، خرداد ۱۳۸۴، "منابع تولید انرژی در قرن بیست و یکم"، انتشارات دانشگاه خواجه

نصیرالدین طوسی، ص ۶۰۲

[۲] عباس پور، مجید، ۱۳۶۶، "نیروگاههای برق آبی"، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی چاپ اول.

[۳] نیلی، سیمین، ۱۳۸۹، "راهنمای بهره برداری و نگهداری نیروگاههای آبی سدهای بزرگ"، نشریه شماره

۵۲۶، وزارت نیرو شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور.

[۴] هوشمند، رحمت الله، ۱۳۸۹، "تولید برق در نیروگاهها"، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ دوم

[۵] کراری، مهدی، ۱۳۸۲، "دینامیک و کنترل سیستمهای قدرت" انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. چاپ

اول.

[۶] تقی راد، حمیدرضا، شهریور ۱۳۸۸، "مقدمه‌ای بر اتوماسیون و کنترل فرآیندهای صنعتی"، انتشارات

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، چاپ اول.

[7] Nand,kishor.(2007), "A review on hydropower plant models and control", Science direct, renewable & sustainable energy reviews,p776-796.

[8] Honging Fang, ..., "Basic Modeling and Simulation Tool for Analysis of Hydraulic Transients in hydroelectric Power Plants", IEEE transaction, Energy conversation, VOL ,23, NO 3, September 2008.

[9] Luz Alexandra Lucero Tenorio," Hydro Turbine and Governor Modelling", Norwegian University of Science and Technology, january 2010.

[10] working group on prime mover and energy supply models for system dynamic performance studies, (1992), "Hydraulic Turbine and Control Models for System Dynamic Studies", IEEE trans ,Power systems ,Vol. 7,No,1.

- [11] Louis N.Hannett, B. Fardanesh, (1994). “ Field test of validate hydro turbine-governor model structure and parameters”, IEEE transaction on power system, Vol.9,No.4.
- [12] Jin.Jiang , (1995), “ design of an optimal robust governor for hydraulic turbine generating units” , IEEE transaction on Energy Conversation ,Vol. 10, No,1.
- [13] YE .Luqing, O.P.Malik, (1989), “Variable structure and time-varying parameter control for Hydraulic generating unit” , IEEE transaction on Energy Conversation, Vol.4, NO,3.
- [15] Robert E. Doan, K.Natarajan, (2004), “ Modeling and control design for governing hydroelectric turbine with leaky wicket gates” , IEEE transaction on Energy Conversation, VOL. 19, NO,2.
- [16] S. Muntean,...," Experimental Investigations into a francis turbine with low specific speed", U.P.B.Sci.Bull.,2009
- [۱۷] علوی، سید حسین. یزدی زاده، علیرضا، (۱۳۸۹)، "مدلسازی دینامیکی و شناسایی بخش هیدرولیک نیروگاه برق آبی دز"، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق.
- [18] Bruno, strah,... , " Speed and Active Power Control of Hydro Turbine Unit", IEEE transaction on energy conversation, VOL 20, June 2005.
- [19] J.M. Undrill,..., " Nonlinear Hydro Governing Model and Improved Calculation for Determining Temporary Droop, " IEEE transaction, Power Apparatus And Systems, April 1967.
- [20] Dewi, Jones,(2004), “Predictive Feed forward for a Hydroelectric Plant” , IEEE transaction, control system technology ,Vol ,12.
- [21] Dianwei,qian,..., "design of reduced order sliding mode governor for hydro-turbines", American control conference 2011.
- [22] Hugo, Villegas Pico, ..., "Analysis of very Low Frequency Oscillations in Hydro-Dominant Power Systems Using Multi-Unit Modeling", IEEE transaction, power systems, 2012
- [23] Nand.kishor,(2008), “Nonlinear predictive control to track deviated power of an identified NNARX model of a hydro plant” ,ELSEVIER, Expert system with application 35 ,pp1741-1751.
- [24] Maria.Regina Gomez Zoby, Jurandir Itizo Yanagihara,(2009), “Analysis of Primary Control system of a Hydropower Plant in Isolated Model” ,J.of the braz.Soc.of Mech.Sci.& Eng, Vol.XXXI,No.1/5.

[25

26

- [27] Franz. Rothlauf ,(2005), “representation for genetic and evolutionary algorithms” ,second edition, Springer Press, 2005.
- [28] Mitchell , Melanie(1999), “ An introduction to genetic algorithms” ,fifth edition, MIT press.
- [29] George K.Stefopoulos ,(2005), “ A genetic algorithm solution to the governor-turbine dynamic model identification in multi-machine power systems” , 44th IEEE conference on decision and control.
- [30] Alfi Alireza, (2011), “PSO with adaptive mutation and inertia weight and its application in parameter estimation of dynamic systems” , Science Direct, Acta Automatica Sinica, Vol.37, NO.5.
- [31] H.Modares, A.Alfi ,(2010), “ Parameter estimation of bilinear systems based on an adaptive particle swarm optimization” , ELSEVIER, Engineering Applications of Artificial Intelligence.
- [32] Hamidreza Modares, Alireza Alfi , Mohammad-Mehdi Fateh,(2010), “ Parameter identification of chaotic dynamic systems through an improved particle swarm optimization” , ELSEVIER, Expert System with applications, vol(37), pp, 3714-3720.
- [33] Alireza Alfi, Mohammad-mehdi Fateh,(2011), “ Intelligent identification and control using improved fuzzy particle swarm optimization” , ELSEVIER , Expert System with Applications, pp,12312-12317.

[۳۴] جزوه آموزشی تارنمای، www.matlabsite.com

- [35] Hongqing Fang, Long Chen, Zuyi Shen,(2011), “Application of an improved PSO algorithm to optimal tuning of PID gains for water turbine governor” , ELSEVIER , Energy Conversion and Management.
- [36] Aiwen Guo,... " self tuning PID control of Hydro-turbine Governor Based on Genetic Neural Networks", Springer- Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [37] Alireza.Alfi, Hamidreza.modares ,(2010), “ System identification and control using adaptive particle swarm optimization” , ELSEVIER, Applied Mathematical Modelling.

Abstract:

Water shortage crisis and new generation of environmentally friendly energy is the most important challenge in the world. One of the solution to this challenge is the construction of a dam and power plant.

Many equipment of power plant and network are sensitive to frequency variation, the steady speed of the turbine is one of the necessities. The governor controls the turbine speed and the governor uses the PID controllers for this purpose. Turbine speed control system includes hydraulic, turbine, servo motor (to open and close the valve) and generator. Non-minimum phase, complexity, non-linear and uncertainty makes tuning the PID controllers is difficult. In this thesis the evolutionary algorithm (PSO and GA) is used to set these coefficients, these algorithms have had a good performance in optimization issues. The PSO algorithm performs better than the genetic algorithm. The problem of both algorithms is the slow convergence rate. To solve this problem, the PSO was used for optimization of neural network weights. Because the system model is not accurate, an identifier has been used to adjust the controller coefficients. Finally the Dez dam is modeled. The above algorithms are simulated to identify and control this dam. In simulating the controller's performance for sudden change of load and sudden change of set point is done.

Power plant, Dez dam, Governor, PID controller, Neural Network, Particle Swarm Optimization, Genetic Algorithm.



Faculty of Electrical Engineering and Robotics
Electrical and Control engineering

Identification and Intelligent Control of Medium- Height Hydro Turbines

By: Amin Allah Dehghan

Supervisor:
Dr: Alireza Alfi

January 2013